



Universidad  
Carlos III de Madrid

Departamento de Teoría de Señal y Comunicaciones

## **PROYECTO FIN DE CARRERA**

# **ESTUDIO, DISEÑO Y FABRICACIÓN DE ANTENAS DE DOBLE BANDA PARA AUTOMÓVILES**

Autor: Manuel Campillo Muñoz

Tutor: Luis F. Inclán Sánchez

**INGENIERÍA TÉCNICA DE TELECOMUNICACIÓN:  
SISTEMAS DE TELECOMUNICACIÓN**

Enero de 2011



**Título:** Estudio, diseño y fabricación de antenas de doble banda para automóviles

**Autor:** Manuel Campillo Muñoz

**Director:** Luis F. Inclán Sánchez

## **EL TRIBUNAL**

**Presidente:** Eva Rajo Iglesias

**Vocal:** Óscar Quevedo Teruel

**Secretario:** Emilio Parrado Hernández

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 13 de Enero de 2011 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la **CALIFICACIÓN** de

Fdo.: PRESIDENTE

Fdo.: SECRETARIO

Fdo.: VOCAL

*a Ester, a mis padres  
Luis Manuel y Ángeles,  
y a mis hermanos Luis y Enrique.*

# Agradecimientos

Siempre es especial el día que uno termina lo que ha empezado tiempo atrás.

En mi caso, hace ya seis años desde que empecé Ingeniería de Telecomunicación en la UPM allá por 2004.

En todo este tiempo en la Universidad he vivido muchas alegrías y éxitos, he conocido muy buenos amigos y compañeros y he tenido también muy buenos profesores (Luis, tú fuiste uno de ellos). Pero también me ha tocado sufrir decepciones, frustraciones, impotencia y hasta he llorado en algún momento.

El camino es duro hasta que llega el esperado momento: ¡¡soy ingeniero!!

Todavía recuerdo en Octubre de 2006 las dudas y la indecisión cuando me cambié a la Carlos III para seguir estudiando telecomunicaciones, pero esta vez como Ingeniero Técnico. Fue la mejor decisión que pude tomar en ese momento. Aquí he conocido a muy buenos amigos y compañeros: David, Carlos, Alberto, Javi, Víctor, Sergio, Kike, Xolo y... muchos más a los que nunca olvidaré. Recuerdo aquellos días interminables en la Uni con prácticas por la mañana y clases por la tarde, teniendo como único descanso nuestras partidas de mus después de comer, y mis famosos “¡¡Órdago!!” para no llegar tarde a clase. ¡¡Este proyecto es también gracias a vosotros tíos!!

Pero de los que realmente te acuerdas en este momento tan especial, y a quien me gustaría dedicar sobretodo este proyecto, son a las personas más importantes en mi vida: a Ester, por estar SIEMPRE ahí; a mis padres, por su INFINITA paciencia; y a mis hermanos, por todos estos años como INCANSABLES amigos y compañeros de piso. Sin todos ellos, esto no hubiera sido posible.

Gracias Ester por ser la mejor amiga, compañera y apoyo que he tenido estos años. Por estar en los momentos malos y en los buenos. ¿Recuerdas el día que decidí cambiarme de carrera? ...GRACIAS. Y también por tu amor, por quererme tanto y por querer ser mi esposa para toda la vida. Te quiero.

Gracias Mamá por estar siempre ahí para cuidarme, escucharme y apoyarme. Gracias Papá por tus consejos, por querer siempre lo mejor para mí y por tu paciencia. Sois los mejores. Os quiero.

Y gracias a vosotros Luis y Enrique, por todos estos años aguantando mis manías, mis días buenos y mis días malos en el piso. Os quiero.

Agradecer también a mis futuros suegros Pili y Jorge, por vuestro apoyo, por ser unos buenos amigos y por descubrirme la Palabra.

Acordarme además con muchísimo cariño de mis abuelos, Manolo y Encarna, de mis yayos Manolo y Victoria, y de mis tíos, primos y familia en general. Y también de mis amigos de Toledo: Sergio, Jaime, Antonio, Julio, Kike y Juanfer.

A todos, GRACIAS.

# Resumen

Hoy día, los servicios inalámbricos de telecomunicación han conseguido ocupar un lugar destacado en el mercado de las nuevas tecnologías. Acceso inalámbrico a Internet, GPS o telefonía móvil de segunda y tercera generación son algunos ejemplos de los múltiples servicios ofrecidos al usuario.

Este auge de lo inalámbrico, afecta también al sector del automóvil, pues los usuarios necesitan estar comunicados en cualquier parte, incluso cuando van en el interior de su coche. El inconveniente está en la necesidad de instalar una antena por cada servicio inalámbrico incluido en el coche. Por esto, los fabricantes buscan ya nuevos diseños de antena que puedan cubrir más de un servicio radio y evitar así en lo posible, la ubicación de multitud de antenas en el vehículo.

Este proyecto describe el estudio, diseño y fabricación de antenas capaces de cubrir más de una banda. En concreto, se diseñan varias antenas para servicios como Galileo, GSM y UMTS, ofreciendo así al ocupante radionavegación y telefonía móvil de segunda y tercera generación.

Se trata de que las antenas sean lo más baratas y discretas posibles, de manera que se ha optado por las antenas impresas. Dentro de éstas existen también diferentes tipos, y se elige uno u otro en función de la dirección en que llega la señal de la fuente emisora. En el caso de la diseñada para el sistema Galileo, la antena será de tipo parche por la característica de broadside de su diagrama de radiación; y en el caso de las antenas de telefonía móvil, se ha optado por monopolos planos cuyo diagrama de radiación es máximo en el plano correspondiente a la superficie terrestre, de manera que permita recibir adecuadamente la señal de las estaciones base de telefonía.

Tras el estudio y diseño de las antenas propuestas, se consigue finalmente una capaz de operar en las bandas de GSM1800 y de UMTS, por lo que se fabrica para estudiar su comportamiento en ambientes reales electromagnéticos.

Se mide además su comportamiento con un plano de masa cerca del puerto de alimentación tratando de imitar el techo de un coche, y además se mide la antena rodeada de un material plástico con el objetivo de imitar la situación dentro de un radomo.

Finalmente, se exponen la conclusión y líneas futuras del proyecto, así como una estimación del presupuesto del proyecto.

**Palabras clave:** antena, servicios inalámbricos, automóvil, usuario, Galileo, telefonía móvil, radomo.

# Abstract

Nowadays, telecommunications wireless systems are in the top of the hi-tech markets. Wireless Internet, GPS and mobile phones are some examples of the quantity of services available for users. This wireless boom also affects to Car Sector because of users need to be connected anywhere, even when they are in their cars. The trouble is the need of installing antennas for each wireless service. So that, manufacturers look for new antenna designs that could embrace two or more bands and so, avoid as far as possible, cars with a lot of antennas.

This project describes the study, design and production of antennas operating in two bands. To sum up, various antennas are design to provide systems like Galileo, GSM and UMTS. The purpose is to be cheap and discreet antennas and therefore, microstrip antennas are the solution. Within these, different kinds also exist and they are used depending on the received signal. In case of Galileo system, it will be a patch antenna due to its broadside radiation pattern; and in case of mobile phones systems, they will be a planar monopole antenna whose radiation pattern is maximum in the plane formed by terrestrial surface, so that antenna picks up the base station signals.

After study and design the proposed antennas, it is obtained one operating in GSM1800/UMTS bands, which are produced to study its conduct in real electromagnetic environments. The antenna is with a ground plane near of the feed point to imitate the car roof effect and the effect of surround the antenna with a plastic material to imitate a radome.

Finally, conclusions and future lines are exposed, as well as a budget estimation.

**Keywords:** antenna, wireless systems, car, user, Galileo, mobile phone, radome.

# Índice general

<b>INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....</b>	<b>12</b>
1.1 INTRODUCCIÓN .....	12
1.2 MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS .....	12
1.3 ESTADO DEL ARTE .....	14
1.4 ANTENAS IMPRESAS.....	17
1.5 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA .....	19
<b>ANTENAS GALILEO Y GSM .....</b>	<b>20</b>
2.1 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS GALILEO Y GSM .....	20
2.2 DISEÑO Y ESTUDIO DE UNA ANTENA COMPATIBLE CON EL SISTEMA DE RADIONAVEGACIÓN GALILEO .....	21
2.2.1 <i>Diseño de un modelo de antena Galileo</i> .....	21
2.2.2 <i>Análisis paramétrico de la antena Galileo</i> .....	22
2.2.3 <i>Diagrama de radiación y distribución de campo del modelo final</i> .....	26
2.3 DISEÑO Y ESTUDIO DE ANTENA PARA TELEFONÍA MÓVIL 2G (GSM) .....	27
2.3.1 <i>Diseño del modelo de antena GSM</i> .....	27
2.3.2 <i>Análisis paramétrico del modelo de antena para GSM</i> .....	28
2.3.3 <i>Diagrama de radiación y distribución de campo del modelo propuesto para GSM</i> .....	34
<b>ANTENA EN BANDAS GSM1800 - UMTS .....</b>	<b>38</b>
3.1 INTRODUCCIÓN AL ESTÁNDAR DE TELEFONÍA MÓVIL UMTS.....	38
3.2 DISEÑO Y ESTUDIO DE ANTENA PARA SISTEMAS GSM1800 – UMTS – BLUETOOTH.....	38
3.2.1 <i>Diseño del modelo propuesto</i> .....	38
3.2.2 <i>Análisis paramétrico de la antena</i> .....	40
3.2.3 <i>Optimización de la antena propuesta</i> .....	48
3.3 DISEÑO Y ESTUDIO DE ANTENA EN DOBLE BANDA PARA LOS SERVICIOS GSM1800 – UMTS.....	50
3.3.1 <i>Diseño del modelo propuesto</i> .....	50
3.3.2 <i>Análisis paramétrico de la antena en doble banda</i> .....	50
3.3.3 <i>Diagramas de radiación y distribución de campo del modelo final</i> .....	55
3.4 FABRICACIÓN Y MEDIDA DE LA ANTENA DISEÑADA EN DOBLE BANDA PARA GSM1800 – UMTS.....	59
3.4.1 <i>Medida de la antena</i> .....	60
<b>CONCLUSIÓN Y LÍNEAS FUTURAS .....</b>	<b>63</b>
<b>PRESUPUESTO.....</b>	<b>65</b>



# Índice de figuras

Figura 1. Dibujo de una antena cubierta por un radomo de tipo “aleta de tiburón” .....	13
Figura 2. Posible ubicación de las antenas de un coche de manera que se evitan posibles actos vandálicos. Éstas deben ubicarse de manera que no se interfieran los sistemas entre sí.....	14
Figura 3. Ejemplo de cableado interno de antena en un retrovisor .....	15
Figura 4. Ejemplo de parche circular con un diagrama de radiación que pretende ser omniacimutal .....	15
Figura 5. Ejemplo de parche para GPS cubierto por un tipo de pintura .....	16
Figura 6. Pérdidas de retorno para los diferentes tipos de pintura del estudio.....	16
Figura 7. Ganancia de la antena según qué pintura la recubre .....	17
Figura 8. Posibles geometrías para el parche aplicables en un diseño de antena impresa .....	18
Figura 9. Alimentación tipo coaxial para antena tipo parche circular .....	19
Figura 10. Parámetros básicos de un parche cuadrado .....	21
Figura 11. Uso de un puerto discreto para la alimentación del parche para Galileo .....	22
Figura 12. Pérdidas de retorno en función de la frecuencia, correspondientes a la simulación de un parche para Galileo .....	23
Figura 13. Parámetro $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a la simulación de un parche para Galileo con distintos grosores del sustrato .....	23
Figura 14. Parámetro $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a la simulación de un parche para Galileo con diferentes tamaños de plano de masa .....	24
Figura 15. Parámetro $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a la simulación de un parche para Galileo con diferentes tamaños del parche metálico.....	25
Figura 16. Valores de longitud del parche metálico que consiguen adaptar la antena en torno a la frecuencia de resonancia.....	25
Figura 17. Diagrama de radiación simulado en 3D a la frecuencia central del parche Galileo (1575 MHz) .	26
Figura 18. Plano-E del diagrama a 1575 MHz .....	26
Figura 19. Plano-H del diagrama a 1575 MHz .....	26
Figura 20. Distribución del módulo de la componente ‘x’ del campo E en el parche Galileo (vista frontal)	27
Figura 21. Modelo inicial de referencia diseñado para operar en las bandas de GSM.....	27
Figura 22. Parametrización del diseño inicial de antena GSM.....	28
Figura 23. Curva de adaptación tras simular con el valor original de los parámetros del diseño de referencia .....	28
Figura 24. Parámetro $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a la simulación de la antena GSM frente a variaciones en el grosor del sustrato .....	29
Figura 25. Parámetro $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a un grosor de sustrato de 1 mm .....	30
Figura 26. Parámetro $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a la simulación de la antena GSM para distintos anchos del brazo externo de la antena .....	30
Figura 27. Parámetro $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a la simulación de la antena GSM para distintos valores del ancho del brazo interior de la antena .....	31
Figura 28. Parámetro $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a la simulación de la antena GSM para diferentes longitudes de los brazos .....	32
Figura 29. Antena GSM propuesta con stub de adaptación .....	32

Figura 30. Parámetro $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a la simulación de la antena GSM para diferentes posiciones del stub de adaptación .....	33
Figura 31. Curvas de adaptación resultantes al medir la antena y compararla con la simulación si se varía la distancia del stub respecto del puerto de alimentación .....	33
Figura 32. Diagrama de radiación en 3D a 900 MHz de la antena GSM.....	34
Figura 33. Plano XY a 900 MHz (corte en $\theta=90^\circ$ ).....	35
Figura 34. Plano XZ a 900 MHz (corte en $\phi=0^\circ$ ) .....	35
Figura 35. Diagrama de radiación en 3D a 1800 MHz de la antena GSM .....	35
Figura 36. Plano XY a 1800 MHz(corte en $\theta=90^\circ$ ).....	36
Figura 37. Plano XZ a 1800 MHz (corte en $\phi=0^\circ$ ) .....	36
Figura 38. Distribución de campo a 900 MHz en la componente Y (vista frontal de la antena) .....	36
Figura 39. Distribución de campo a 900 MHz en la componente Z (vista frontal de la antena) .....	37
Figura 40. Distribución de campo a 1800 MHz en la componente Y (vista frontal de la antena) .....	37
Figura 41. Distribución de campo a 1800 MHz en la componente Z (vista frontal de la antena) .....	37
Figura 42. Modelo inicial de referencia para diseñar la antena .....	39
Figura 43. Parametrización del diseño inicial de antena .....	39
Figura 44. Puerto de guíaonda que alimenta la antena .....	39
Figura 45. Curva de adaptación tras simular con los parámetros originales del diseño de referencia .....	40
Figura 46. Parámetro $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a la simulación de la antena disminuyendo la longitud de la “península” .....	41
Figura 47. Parámetro $S_{1,1}$ [dB] resultado de la simulación de la antena con un valor de 7 mm para la distancia “península”- extremo de parche y para la longitud de la “península”.....	41
Figura 48. Parámetro $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a la simulación de la antena haciendo variar la longitud del elemento radiante.....	42
Figura 49. Parámetro $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a la simulación de la antena duplicando el grosor del sustrato .....	43
Figura 50. Parámetro $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a un aumento de ‘G1’ y ‘G2’ hasta los 3 y 3.5 mm respectivamente.....	43
Figura 51. Parámetro $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a la simulación de la antena con un aumento hasta los 18 mm la longitud del parámetro L1 del brazo .....	44
Figura 52. Parámetro $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a la simulación de la antena disminuyendo hasta los 13 mm la longitud del parámetro L1 del brazo .....	44
Figura 53. Parámetro $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a la simulación de la antena variando de nuevo la longitud de la península de la parte posterior, pero con longitud L1 de 13mm .....	45
Figura 54. Parámetro $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a la simulación de la antena variando la distancia que separa el plano de masa con el elemento radiante .....	46
Figura 55. Parámetro $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a la simulación de la antena variando ‘sty’ y manteniendo ‘dst’ constante a 8.5 mm .....	46
Figura 56. Parámetro $S_{1,1}$ [dB] de la simulación de la antena variando el valor del parámetro ‘dst’ y manteniendo ‘sty’ constante en 2 mm .....	47
Figura 57. Parámetro $S_{1,1}$ [dB] de la simulación de la antena disminuyendo la longitud de la línea de alimentación.....	48
Figura 58. Apariencia del optimizador proporcionado en el software de CST .....	49
Figura 59. Parámetro $S_{1,1}$ [dB] de la simulación de la antena tras la optimización .....	49
Figura 60. Nueva configuración de los parámetros para la antena en doble banda que sustituirá a la anterior .....	50
Figura 61. Parámetro $S_{1,1}$ [dB] correspondiente al apartado 3.2.3.j y que sirve de punto de partida en este nuevo apartado .....	50
Figura 62. Parámetro $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a la simulación de la antena de doble banda con distintos grosores de sustrato .....	51
Figura 63. Parámetro $S_{1,1}$ [dB] de pérdidas correspondiente a la simulación de la antena de doble banda con un grosor de sustrato de 0.5 mm .....	51
Figura 64. Modificación en la antena original. Eliminación de muescas.....	52
Figura 65. Parámetro $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a la simulación del nuevo diseño de la antena de doble banda: sin muescas de unión ente “brazos” .....	52
Figura 66. 2ª modificación del prototipo original .....	53

Figura 67. Parámetro $S_{1,1}$ [dB] de pérdidas correspondiente a la simulación de la nueva antena de doble banda con una sola muesca .....	53
Figura 68. Aumento de la muesca de unión .....	54
Figura 69. Parámetro $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a la simulación de la nueva antena de doble banda con una muesca del doble de tamaño .....	54
Figura 70. Parámetro $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a la simulación de la nueva antena de doble banda con diferentes longitudes .....	55
Figura 71. Diagrama en 3D a 1795 MHz de la antena GSM1800/UMTS .....	55
Figura 72. Plano XY a 1795 MHz(corte en $\theta=90^\circ$ ) .....	56
Figura 73. Plano XZ a 1795 MHz (corte en $\phi=0^\circ$ ) .....	56
Figura 74. Diagrama en 3D a 2045 MHz de la antena GSM1800/UMTS .....	56
Figura 75. Plano XY a 2045 MHz(corte en $\theta=90^\circ$ ) .....	57
Figura 76. Plano XZ a 2045 MHz (corte en $\phi=0^\circ$ ) .....	57
Figura 77. Distribución de campo a 1795 MHz (vista frontal) .....	57
Figura 78. Distribución de campo dentro de la antena a 1795 MHz (vista frontal) .....	58
Figura 79. Distribución de campo a 2045 MHz (vista frontal) .....	58
Figura 80. Vista frontal de la antena fabricada .....	59
Figura 81. Vista trasera de la antena fabricada .....	59
Figura 82. Comparación entre la simulación y la medida .....	60
Figura 83. Comparación de la antena simulada con la antena-techo metálico .....	61
Figura 84. Antena tipo "aleta de tiburón" sobre el techo de un coche .....	61
Figura 85. Antena real cubierta por el radomo provisional .....	62
Figura 86. Comparación de la antena-techo con y sin radomo .....	62

## Índice de tablas

Tabla 1. Diagrama de Gantt (en semanas) .....	66
Tabla 2. Presupuesto para la primera antena .....	66
Tabla 3. Presupuesto de una antena construida tras el primer diseño .....	67

# Capítulo 1

## Introducción y objetivos

### 1.1 Introducción

Hoy en día las comunicaciones inalámbricas están revolucionando el mundo de los servicios y redes de telecomunicación. Aplicaciones como la telefonía móvil de segunda y tercera generación, el acceso inalámbrico a Internet vía Wi-Fi y la radionavegación por satélite GPS son algunos de los múltiples servicios inalámbricos que más éxito están teniendo entre la población. Todos ellos se caracterizan por lo cómodo y práctico que resulta comunicarse “sin hilos”, utilizando el aire como medio de propagación de las ondas electromagnéticas.

Para que esto sea posible, existe un elemento que es común e indispensable en cualquier transmisión y/o recepción de un dispositivo inalámbrico: la antena. Hoy podemos encontrar antenas prácticamente en cualquier dispositivo: televisiones, sintonizadores de radio, teléfonos móviles, navegadores GPS, ordenadores portátiles,... No se puede negar que lo inalámbrico está de moda.

Uno de los sectores en el que el desarrollo de las comunicaciones inalámbricas no ha pasado desapercibido es en la industria del automóvil, produciéndose en los últimos años un incremento en el número de servicios inalámbricos demandado por sus usuarios: desde la radio convencional, hasta el GPS, pasando por la telefonía móvil, Internet, dispositivos Bluetooth, información en tiempo real del estado de las carreteras, televisión digital... prácticamente todo se está integrando ya en los nuevos vehículos, haciendo que el coche del futuro se convierta en una especie de “oficina rodante” que ofrecerá al usuario multitud de aplicaciones. Como ejemplo, se pueden ver ya modelos como el A8 del fabricante Audi, que incorpora WLAN e Internet vía 3G en sus modelos de alta gama [1].

### 1.2 Motivación y Objetivos

Uno de los problemas que surge al querer incorporar múltiples servicios es la necesidad de colocar una antena por cada aplicación deseada. En un coche actual de gama alta, pueden convivir con la antena de radio convencional hasta al menos cinco antenas más para servicios como broadcasting (TV), teléfono móvil, navegación por satélite, control adaptativo de la velocidad de cruce, apertura de puertas sin llave, etc.

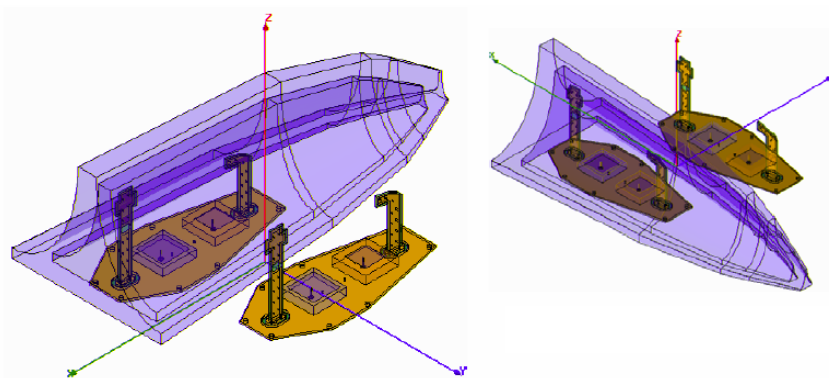
Este proyecto está enfocado al diseño y construcción de una antena que integre más de un servicio inalámbrico, evitando así en lo posible que los coches del futuro incorporen más antenas de las necesarias junto con su respectivo cableado, incrementando así los costes, las necesidades de espacio e incluso provocando posibles problemas relacionados con la compatibilidad electromagnética. Además de esto, se debe tener también en cuenta que los coches tienden cada vez más hacia diseños modernos, lo que lleva al planteamiento de otra cuestión, y es que debido a motivos estéticos, aerodinámicos, de estabilidad o de vandalismo, la instalación de las antenas se debe llevar a cabo en zonas poco visibles.

Por tanto, se trata de diseñar una antena que sea pequeña y que permita dar servicio a más de una aplicación radio. ¿Cómo se pueden cubrir todos estos requisitos? La solución que se plantea es el uso de antenas impresas, caracterizadas por su pequeño tamaño y su fácil construcción. Este tipo de dispositivos, son capaces de trabajar de forma simultánea con diferentes servicios y estándares, lo que las convierte en un excelente recurso para evitar incorporar en los vehículos más antenas de las necesarias. Y con una sola, se cubre más de una banda de frecuencia.

El punto de partida de este trabajo es el estudio de dos antenas de telefonía móvil ya publicadas. Se trata de analizarlas y estudiarlas, de manera que se consiga un funcionamiento apropiado en un rango de frecuencias concreto. Para ello, se llevan a cabo una serie de modificaciones sobre el modelo original que permiten ajustar su funcionamiento y fabricar una de ellas para su posterior medida. En concreto, para los diseños se utilizará el software de simulación electromagnética *CST Microwave Studio*, usado hoy en día por el Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad Carlos III de Madrid.

Y finalmente, teniendo en cuenta la necesidad de una cubierta que garantice la protección de la antena, se emulará una cubierta o radomo, para analizar así, si su inclusión afecta o no a las propiedades electromagnéticas de la antena. Lo deseado es que se comporte de tal forma que modifique poco el comportamiento de la antena.

Hoy en día se pueden ver diferentes modelos de coches con estas cubiertas específicas para antenas impresas, siendo la más común la que tiene forma de “aleta de tiburón”:



**Figura 1. Dibujo de una antena cubierta por un radomo de tipo “aleta de tiburón”**

## 1.3 Estado del Arte

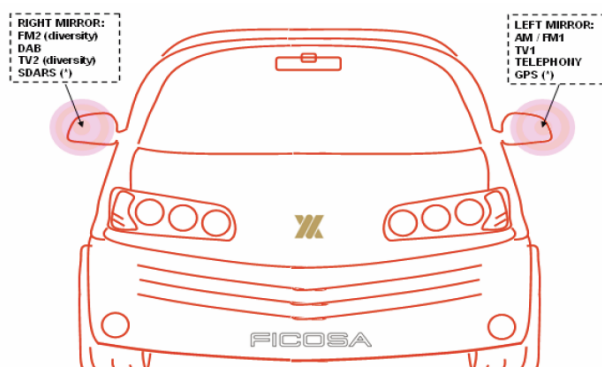
El primer receptor de radio en ser instalado en un automóvil data de 1932 [2]. Se trataba del BLAUPUNKT AUTOSERVER AS5 que pesaba 15 kilos y cuyo formato era similar a una caja grande de zapatos. En aquella época no había nacido todavía la FM (lo hará en Alemania en 1952), la cual daría problemas a los automovilistas porque se perdía constantemente la señal por el movimiento del coche. En los inicios, los receptores instalados sólo podían sintonizar emisoras de onda larga y onda media, para lo cual los automovilistas disponían además de una pequeña antena en la parte externa del coche. El coste de un receptor de estas características era una pequeña fortuna para su tiempo: 465 marcos de aquella época [2]. Con el paso del tiempo el aparato de radio se convirtió en una señal de distinción, reservado por tanto a los modelos más caros. Sólo el gran *boom* automovilístico de los sesenta popularizaría su instalación y posterior evolución hasta lo que hoy conocemos.

La industria del automóvil no avanzó sólo en el uso de la radio convencional. Un hueco importante lo tuvo también el deseo de poder comunicarse a través del teléfono en cualquier momento mientras circulábamos en el coche.

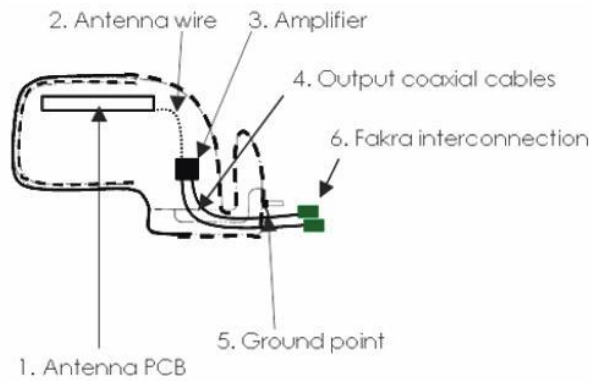
En la época predecesora a los teléfonos móviles, la gente que realmente necesitaba comunicación móvil tenía que confiar en el uso del radio-teléfono en sus coches. En este sistema existía sólo una antena central por cada ciudad, y aproximadamente 25 canales disponibles en la torre. Esta antena central significaba que el teléfono en el vehículo requería una antena capaz de transmitir a 50 ó 60 Km de distancia y por tanto no muchas personas podían usar el radio-teléfono, ya que no existían suficientes canales para conectar a todo el que quisiera [2].

Hoy en día el panorama es bien distinto. Los coches incorporan multitud de pequeñas antenas para radio convencional, GPS, telefonía, detección de colisión, radio y TV digital, etc. que darán al usuario capacidad de estar comunicado de múltiples maneras.

Como se comentó en el apartado anterior, el objetivo principal de los actuales diseños es reducir el tamaño de la antena y hacerla lo más discreta posible. Por ello, se comienza a buscar lugares del coche donde la antena vaya más escondida y resulte más aerodinámica. Se estudia su inclusión en diversos lugares, entre ellos en las puertas [3], en el maletero [4] o en los retrovisores del coche [5]. El hecho de ubicarlas en los retrovisores, evitaría por ejemplo posibles actos vandálicos. Pero éstas deberán ir montadas teniendo en cuenta las bandas de funcionamiento y posibles efectos como la diafonía para no producir interferencias entre las antenas:



**Figura 2.** Posible ubicación de las antenas de un coche de manera que se evitan posibles actos vandálicos. Éstas deben ubicarse de manera que no se interfieran los sistemas entre sí

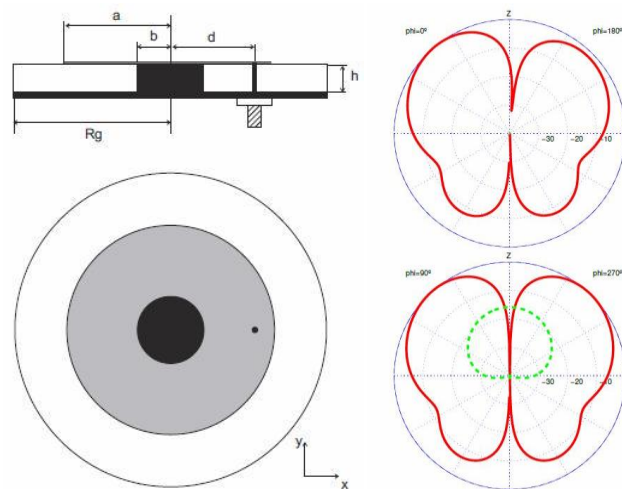


**Figura 3. Ejemplo de cableado interno de antena en un retrovisor**

Sin embargo, parece que la ubicación de la antena en el techo del coche sigue siendo la opción preferida por los constructores.

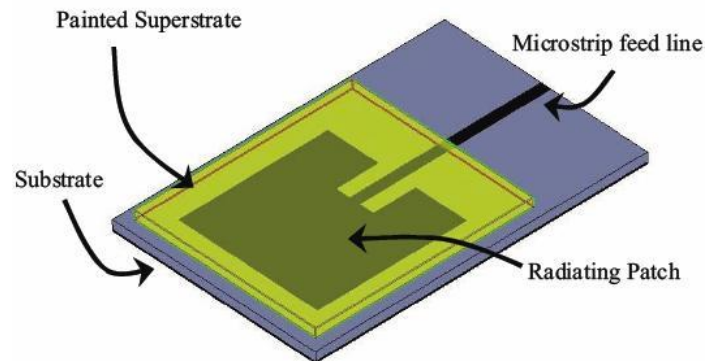
También se estudia la forma que tiene el diagrama de radiación de la antena según cuál vaya a ser su aplicación, ya que no será igual que la antena emisora transmita/reciba hacia/desde el espacio (caso de los satélites para el sistema GPS) o que se encuentre en la superficie terrestre (caso de las estaciones base para telefonía móvil). En el primer caso, una solución frecuente es usar antenas de tipo parche cuyo diagrama de radiación es de tipo broadside, que al tener poca directividad, abarca la señal de varios satélites de los que orbitan alrededor de la Tierra; y en el caso de la telefonía móvil, lo frecuente es usar antenas de tipo dipolo o monopolo cuyo diagrama es máximo en el plano paralelo al plano que forma la superficie terrestre, de manera que apunte a las estaciones base.

Aún así, se estudia ya el uso de antenas tipo parche para conseguir un diagrama de radiación omniacimutal. El método es cortocircuitar el elemento radiante y el plano de masa mediante un pin de corto [6], de manera que se puede aprovechar la forma y tamaño de este tipo de antenas y conseguir prototipos pequeños que no se vean a simple vista:



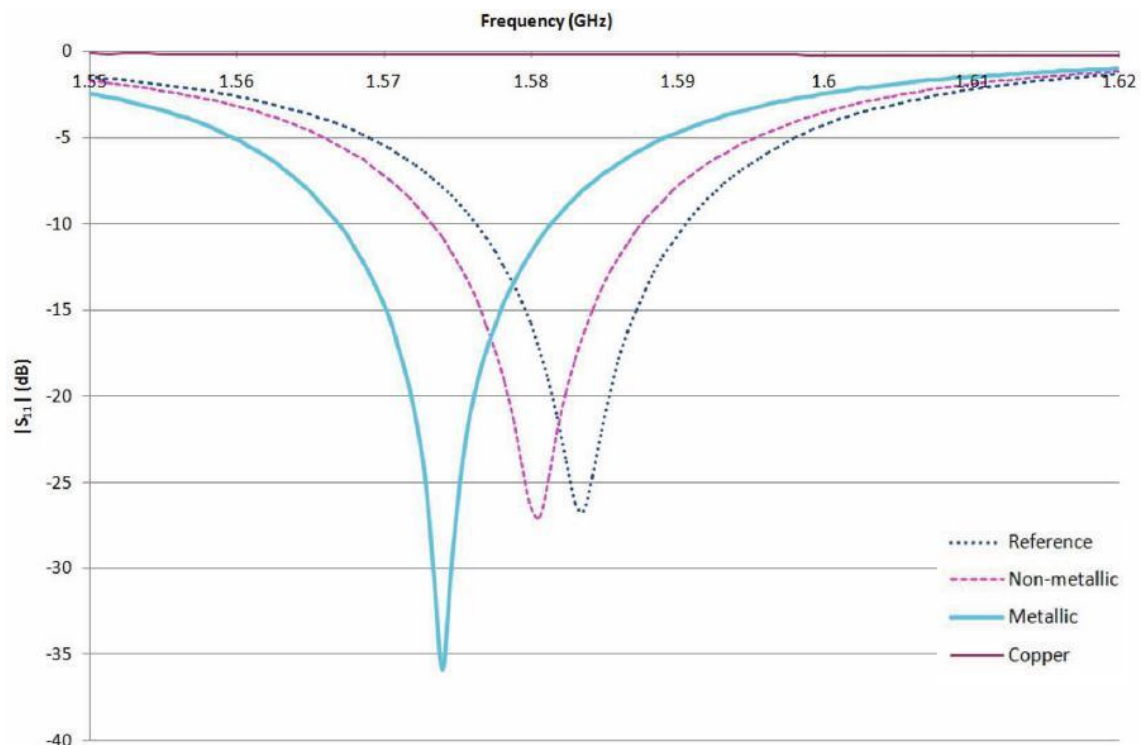
**Figura 4. Ejemplo de parche circular con un diagrama de radiación que pretende ser omniacimutal**

Otra de las líneas de trabajo abiertas es el estudio del efecto que produce la pintura del coche sobre las propiedades electromagnéticas de las antenas. En concreto, se ha investigado en [7] su efecto en un parche diseñado para dar servicio de GPS en la banda L1, cuya frecuencia de resonancia es de 1575 MHz y tiene 20 MHz de ancho de banda.



**Figura 5. Ejemplo de parche para GPS cubierto por un tipo de pintura**

El estudio descrito en [7] se lleva a cabo con tres tipos de pintura distinta: pintura no metalizada, pintura metalizada y un revestimiento de cobre. En primer lugar, se comparan las curvas de adaptación medidas con un analizador de redes vectoriales:



**Figura 6. Pérdidas de retorno para los diferentes tipos de pintura del estudio**

Se observa que varían las frecuencias centrales de operación de la antena en el caso de las pinturas no metalizada y metalizada. Y como era de esperar, si el recubrimiento no es pintura, si no que es de cobre, al ser un metal, el comportamiento electromagnético de la antena queda prácticamente anulado.



Además, el uso de la pintura puede afectar también a la ganancia de las antenas. En el estudio aquí expuesto, se llevaron a cabo también medidas de ganancia con los siguientes resultados:

Superstrate	Gain
Reference	8.0 dBi
Non-metallic	8.0 dBi
Metallic	7.3 dBi
Copper	-19.3 dBi

**Figura 7. Ganancia de la antena según qué pintura la recubre**

Por tanto, estos efectos pueden ser más o menos relevantes a la hora de diseñar una antena, según el uso que queramos darle y de dónde se coloque la antena, pues no tendrá el mismo efecto sobre una que se coloque directamente en el coche y que se pinte sobre ella, que una en el interior de un radomo.

Tras este repaso al Estado del Arte, se puede concluir por tanto, que el estudio de antenas que permiten el uso de las aplicaciones inalámbricas más demandadas en el sector del automóvil está en auge, y que se tienen en cuenta muchos factores para tratar de afectar lo mínimo al comportamiento electromagnético de las antenas.

## 1.4 Antenas Impresas

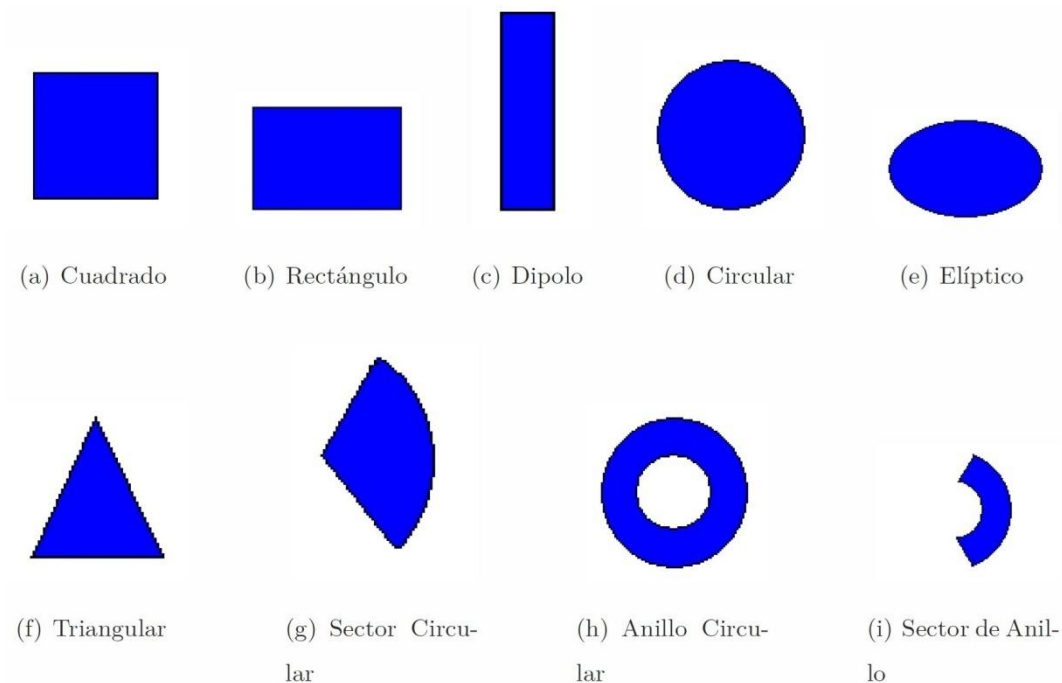
El concepto de antenas impresas o antenas microstrip fue propuesto por Deschamps en 1953 [8], pero tuvieron que pasar 20 años como se comenta en [9] hasta que se fabricaron antenas de este tipo con aplicación práctica. Su desarrollo durante los años 70 se debió a la disponibilidad de buenos substratos con baja tangente de pérdidas y con atractivas propiedades térmicas y mecánicas, y a la mejora de los modelos teóricos. La primera antena con utilidad práctica fue desarrollada por Howell [10] y Munson [11]. Desde entonces, las extensas investigaciones y el desarrollo de nuevas antenas y arrays contribuyeron a la explotación de sus numerosas ventajas respecto a las antenas de microondas convencionales. Algunas son su poco peso, su bajo volumen, su bajo coste y su compatibilidad con circuitos integrados.

Algunos tipos de antenas impresas se introducen a continuación.

### a) Antenas de parche

Las antenas impresas de tipo parche, se diseñan a partir de líneas de transmisión o resonadores sobre un substrato dieléctrico [12]. Actualmente son uno de los elementos radiantes más versátiles debido a sus múltiples ventajas: bajo perfil, bajo coste de fabricación, robustez, posible combinación en circuitos integrados de microondas, y posible diseño para trabajar a diversas frecuencias y con distintas polarizaciones. Sin embargo, también tienen algún inconveniente: reducida ganancia, potencia limitada, alto factor de calidad y en algunos casos pobre pureza de polarización y/o banda estrecha tal y como se cuenta en [12].

Las antenas de parche pueden fabricarse de muy diversas dimensiones y formas. Aunque las geometrías más habituales son rectangulares y circulares, también se pueden encontrar con forma cuadrada, con forma de anillo, de triángulo, de elipse, etc.:



**Figura 8. Posibles geometrías para el parche aplicables en un diseño de antena impresa**

La alimentación de estas antenas puede llevarse a cabo de diversas maneras: mediante línea microstrip, cable coaxial, por ranura o mediante acoplo electromagnético por proximidad [12]. En la alimentación mediante línea microstrip, el acoplamiento entre la línea y la metalización se puede realizar mediante una unión en uno de sus bordes, pero este método tiene un inconveniente claro, ya que la impedancia justo en el borde de la antena es muy alta. Ello dificulta la adaptación.

La alimentación mediante cable coaxial, es uno de los mecanismos más utilizados: el conductor interno del coaxial se extiende a través del dieléctrico y se conecta a la metalización directamente, y el conductor exterior del coaxial se conecta al plano de tierra. La posición del conector determina la adaptación de la antena.

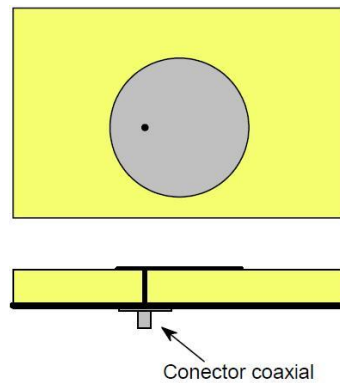
#### **b) Monopolos planos de bajo perfil**

Las antenas de tipo monopolo convencionales en forma de varilla que se pueden encontrar hoy en la mayoría de coches, operan normalmente con longitudes de onda próximas a  $\lambda/4$ , lo que significa que si se quiere trabajar a 900 MHz para comunicaciones móviles 2G, estas antenas deben tener una altura aproximada de unos 83 mm.

Por ello, en este proyecto se trata de reducir el tamaño de los monopolos utilizando la versión impresa de éstos (monopolos planos). Con este tipo de antena, se modela en el capítulo 2 una antena de telefonía móvil 2G pensada para ir montada en el techo de un automóvil.

#### **c) Antenas PIFA**

Otro tipo de antena impresa de uso común son las de tipo plano invertidas-F (PIFA) que resuenan a una determinada frecuencia, pero con menor tamaño. Generalmente, se consigue al cortocircuitar el elemento radiante con su plano de masa mediante un “pin de corto” [13].



**Figura 9. Alimentación tipo coaxial para antena tipo parche circular**

## 1.5 Estructura de la memoria

Tras un capítulo inicial en el que se han definido las motivaciones y objetivos, se detalla a continuación la estructura principal del proyecto.

En el capítulo 2 se diseñan y simulan dos tipos de antenas impresas diferentes.

En primer lugar, se diseña una antena de tipo parche, que por su sencillez, sirve para presentar al lector el entorno del simulador *CST Microwave Studio* en el que se van a realizar los diseños posteriores. Una posible aplicación de este modelo sería la recepción de la señal que emitirá en un futuro el sistema de radionavegación europeo Galileo. Este sistema será un “mapa interactivo en tiempo real”, que servirá de guía a los conductores.

A continuación, se presenta una antena impresa que opera en dos bandas, pero esta vez será de tipo monopolo plano. De esta manera, se trata de reducir el tamaño de los monopolos convencionales, y usarlo para recibir la señal de las estaciones base de telefonía móvil. Su diseño se basa en una antena ya publicada en [14] y que trabaja en las bandas de frecuencia del estándar de 2ª generación GSM → GSM900 (890-960 MHz) y GSM1800 (1710-1880 MHz). Partiendo de su diseño original, se han estudiado sus principales parámetros hasta conseguir una curva de adaptación de impedancias que se asimila a la original. De esta forma, si se ubica la antena en el techo de un coche, permitirá disponer de telefonía móvil 2G en el vehículo.

En el capítulo 3 se continúa con el estudio de los monopolos planos. En este caso, se consigue desplazar el rango de frecuencias de operación hasta conseguir una antena que opera en la banda del servicio de telefonía móvil de 3ª generación UMTS (1920-2170 MHz). Para ello, se parte de una antena ya publicada en [15] que será modificada hasta conseguir una curva de adaptación que abarca la banda de GSM1800 y la de UMTS. Gracias a esto, si se ubicara en el techo de un vehículo, esta antena sería capaz de proporcionar al ocupante acceso a Internet, ya que el estándar UMTS posee una red de datos de alta velocidad pensada para ello. Tras el diseño, se procederá a la fabricación de dicho prototipo, de manera que se puede comprobar su funcionamiento.

Y con el fin de asimilarla todavía más a una antena real, se incorpora dentro de un radomo que sirva de protección a la antena y se estudia también qué efecto electromagnético se produce.

En el cuarto capítulo se presentan las conclusiones del proyecto, así como las líneas de trabajo que quedan abiertas y que podrían ser la continuación de este proyecto.

Y por último, se presenta al final del documento un presupuesto estimado que valora el trabajo realizado, así como los posibles costes de fabricación de una antena.

# Capítulo 2

## Antenas Galileo y GSM

### 2.1 Introducción a los sistemas Galileo y GSM

Dos de los servicios inalámbricos que más éxito están teniendo en el mercado son la telefonía móvil de 2ª Generación GSM y el sistema de posicionamiento por satélite GPS, cuyo equivalente europeo será en un futuro Galileo.

Galileo es el sistema global de navegación por satélite (GNSS) desarrollado por la Unión Europea, con el objetivo de evitar la dependencia de los sistemas actuales como son el GPS (EE.UU) o el GLONASS (Rusia). A diferencia de estos sistemas de origen militar, Galileo será de origen civil y calculará su posición utilizando la señal de una constelación de satélites que orbitan ligeramente más inclinados hacia los polos que los satélites estadounidenses, siendo por tanto más precisos en estas regiones donde actualmente se pierde notablemente la precisión. Asimismo, Galileo garantizará la disponibilidad continua del servicio, excepto en circunstancias extremas, e informará a los usuarios en segundos en caso de fallo de un satélite [9].

GSM (Global System for Mobile communications) en cambio, es el estándar europeo de telefonía móvil digital de mayor aceptación por parte de los usuarios en los últimos años, convirtiéndose así en el sistema de mayor éxito en el mundo. Este sistema supuso un importante cambio en las comunicaciones al introducir por primera vez la digitalización en los servicios móviles de voz. Además, estos sistemas permiten también la transmisión de datos a baja velocidad y el intercambio de mensajes entre usuarios. En un primer momento se utilizó sólo la frecuencia de 900 MHz para el uso de esta tecnología, pero, posteriormente, se comenzaron a usar además las bandas de 1800 y 1900 MHz, por lo que los terminales móviles más modernos pasan a ser tribanda [16].

En este capítulo se trata de dar solución a la necesidad de incorporar estos dos servicios en los automóviles. Por tanto, se diseñan dos antenas: una que trabaja en la banda del sistema Galileo, y a continuación, otra antena que opere en las dos bandas del estándar GSM (GSM900 y GSM1800).

Como ejemplo de esta necesidad están los taxistas y transportistas que hoy día incorporan receptores GPS en su vehículo, habiéndose convertido ya en algo habitual y necesario a la hora de ejercer su profesión. Por esto, generalizar la incorporación de antenas que puedan trabajar con Galileo en los vehículos con vistas a la futura implantación de este sistema europeo, ayudaría entre otros a estos profesionales.

Y en cuanto al estándar GSM de telefonía, se puede decir que su incorporación en los vehículos, ayudaría a mejorar la seguridad y la comodidad de sus ocupantes. Pero en ambos casos, es necesaria la incorporación de nuevas antenas en el coche, pues únicamente con la antena convencional de AM/FM no sería posible.

## 2.2 Diseño y estudio de una antena compatible con el sistema de radionavegación Galileo

Se modela una antena de tipo parche que opera en la banda civil L1 (1559-1591 MHz) de manera que pueda servir para la recepción de la señal de los satélites que proporcionan posicionamiento a través de Galileo.

### 2.2.1 Diseño de un modelo de antena Galileo

El elemento radiante en el caso de parches rectangulares es una metalización de dimensiones  $L \times W$  sobre un sustrato dieléctrico de constante  $\epsilon_r$  y grosor  $h$  cuya parte posterior va cubierta por un plano de masa. La antena se alimenta por un puerto discreto (conector coaxial) que la excita, estableciéndose una distribución de carga entre las dos metalizaciones. En un momento dado, esa cara interna se carga positivamente, mientras que el plano de masa se carga negativamente, creándose fuerzas que arrastran las cargas hacia el borde y que provocan que el campo se desborde. Estas cargas son la fuente de radiación de la antena [9].

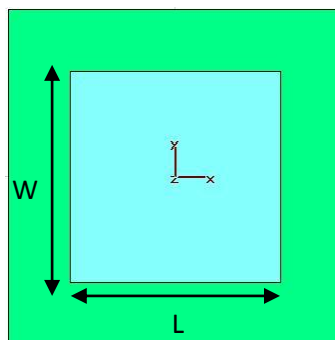


Figura 10. Parámetros básicos de un parche cuadrado

La frecuencia de resonancia en la que queremos que radie dependerá de la longitud  $L$  de la metalización superior, y es un parámetro crítico en el diseño. Para una aproximación de orden cero y modo  $TM_{10}$  la longitud viene dada por ecuación que encontramos en el capítulo 4 de [9]:

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.1)$$

El ancho  $W$  de la metalización sin embargo, tiene un menor efecto sobre la frecuencia de resonancia y el diagrama de radiación. Éste se debe seleccionar de manera que obtengamos una buena eficiencia de radiación. Se recomienda en [9] que  $1 < W/L < 2$ , aunque si se trata de un parche cuadrado, su tamaño viene impuesto:  $W = L$ .

Además, en el caso de las dimensiones del sustrato, se pueden aproximar según [9] por la ecuación 2.2:

$$L_s \approx 6h + L \quad W_s \approx 6h + W$$

siendo 'h' la altura del sustrato.

Una vez seleccionadas las dimensiones del parche para un sustrato dado, el siguiente paso es determinar la posición del puerto de alimentación discreto ( $x_0, y_0$ ), de manera que se pueda obtener una buena adaptación entre la impedancia del generador y la impedancia de entrada del parche. Aunque su ubicación depende de la pendiente de la curva que describe la impedancia en el interior del parche, en este trabajo se propone como punto inicial de colocación del puerto, el valor dado por la aproximación hecha en [17] por Kara en la que se fija  $y_0=0$ , y luego ' $x_0$ ' tiene el valor de la siguiente ecuación:

$$x_0 = \frac{L}{2\sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (2.3)$$

siendo  $\epsilon_{re}$  la constante dieléctrica efectiva, que se obtiene de la siguiente manera:

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \left[ \left( \frac{\epsilon_r - 1}{2} \right) \left( 1 + 12 \frac{h}{L} \right)^{-1/2} \right] \quad (2.4)$$

Con todo esto, se procede al diseño de la antena:

Ir  compuesta de un sustrato de grosor 0.5 mm, permitividad 4.4 y tamaño 65 x 65 mm, además de un plano de masa en la parte posterior también de 65 x 65 mm. Sobre el sustrato se asienta una metalización cuadrada de 45.4 mm de lado (ec. 2.1) para una frecuencia de resonancia de 1575 MHz, que es en la que opera el sistema Galileo.

El puerto discreto utilizado para alimentar la antena, se sitúa inicialmente a la distancia calculada con la ecuación 2.3. Teniendo en cuenta que esta fórmula asume que el origen del sistema de coordenadas est  en la esquina inferior izquierda de la antena, en nuestro caso lo situaremos en  $y = 0, x = -12.69$  mm, pues desplazamos el origen de coordenadas al centro del parche. Aún así, tras esta ubicación inicial, se hicieron varias simulaciones con diferentes localizaciones del puerto de manera que se obtiene un mejor resultado si lo situamos a 1/3 del borde del parche:

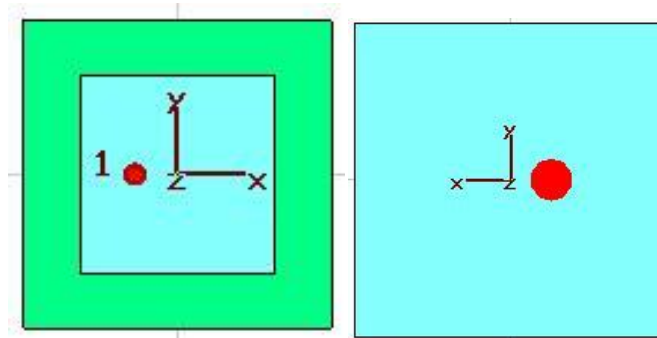


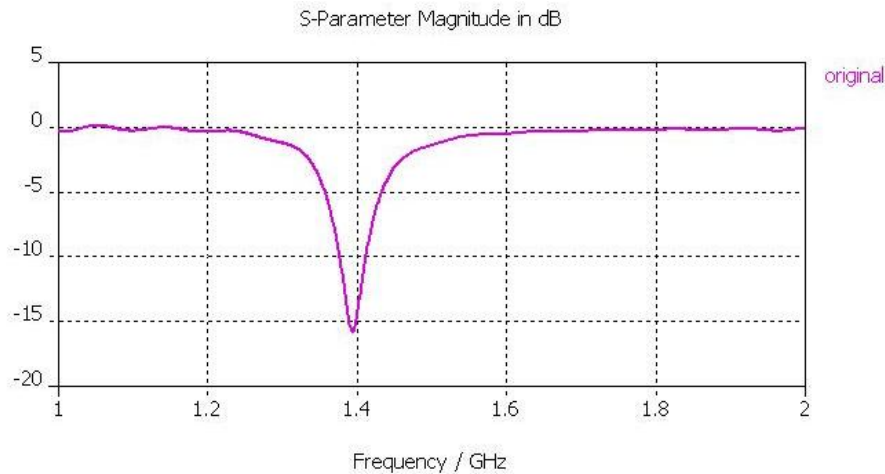
Figura 11. Uso de un puerto discreto para la alimentación del parche para Galileo

## 2.2.2 Análisis paramétrico de la antena Galileo

Una vez se establecen las dimensiones de la antena, se procede a la simulación de la misma mediante el software *CST Microwave Studio*. Éste nos permite obtener una aproximación del comportamiento real de la antena gracias a la curva de adaptación o curva de pérdidas de retorno simulada, que refleja el

parámetro  $S_{1,1}$ [dB] en función de la frecuencia. El umbral para considerar la antena adaptada, es aquél en el que las pérdidas de retorno son inferiores a -10 dB.

Usando los valores calculados en el aparatado anterior para disponer de un primer modelo, se obtiene a continuación una curva de adaptación a partir de la cual se van a modificar diversos parámetros de la antena hasta conseguir que opere en la banda-L1 correspondiente al sistema Galileo.

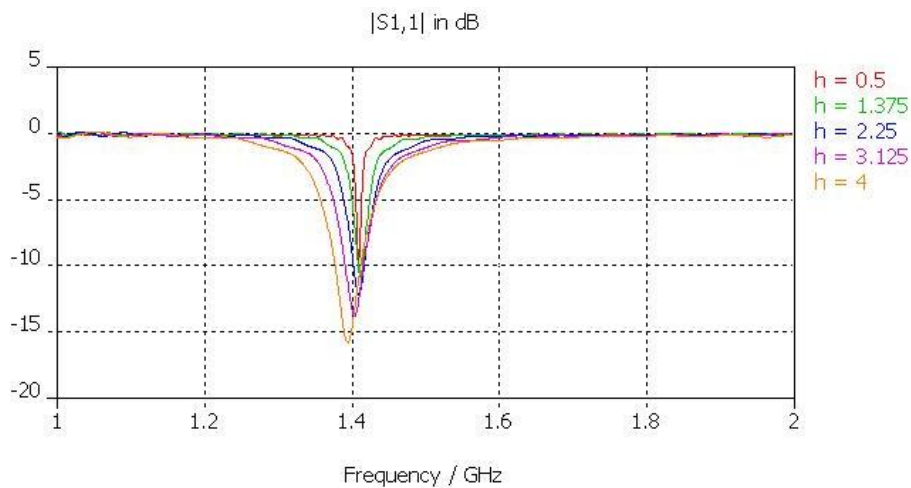


**Figura 12. Pérdidas de retorno en función de la frecuencia, correspondientes a la simulación de un parche para Galileo**

Se puede observar una resonancia alrededor de los 1400 MHz, consiguiendo que la antena esté adaptada en la banda 1375-1410 MHz. Sin embargo, este rango de frecuencias no corresponde con la banda en la que se pretende operar, por lo que se deben ajustar los parámetros que pueden influir en su comportamiento hasta conseguir adaptar las frecuencias a las que trabaja Galileo.

#### **a) Efectos producidos por el grosor del sustrato**

Se obtienen a continuación diferentes curvas de adaptación según el grosor del sustrato utilizado. Para ello, el simulador dispone de una herramienta llamada '*Parameter Sweep*', que permite realizar simulaciones sucesivas para distintos valores de un mismo parámetro. En este caso, el parámetro que controla el grosor del sustrato es '*h*', por lo que se modificará su valor desde los 0.5 mm iniciales, hasta los 4 mm que servirán para comprobar si se consigue una traslación en la frecuencia de resonancia. La curva resultante se muestra a continuación:

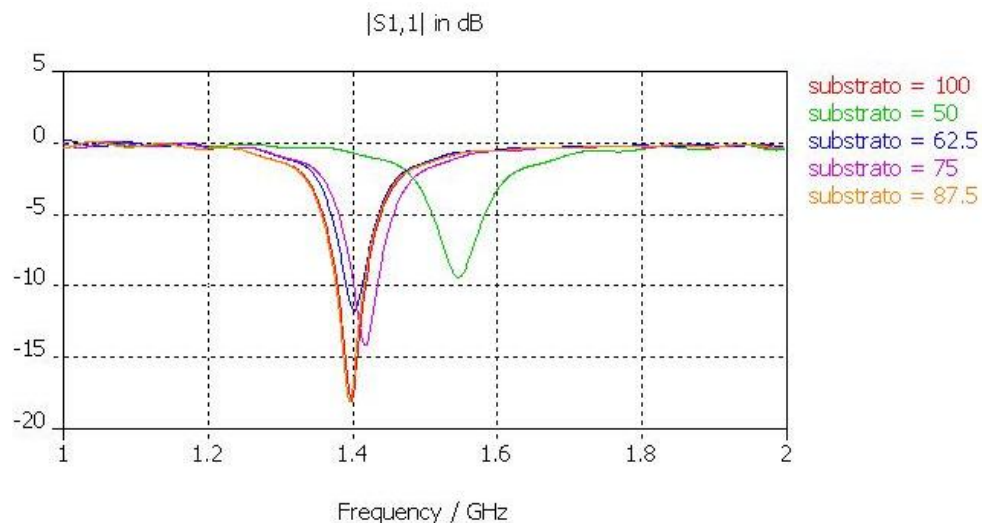


**Figura 13. Parámetro  $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a la simulación de un parche para Galileo con distintos grosores del sustrato**

El efecto producido afecta a la adaptación, pues aumenta o disminuye según se agrande o reduzca el grosor del sustrato, no influyendo en su frecuencia de resonancia. Aún así, viendo la mejora producida en cuanto a adaptación y el aumento en el ancho de banda, modificamos el grosor de nuestro modelo inicial hasta los 4 mm.

#### ***b) Efectos producidos por las dimensiones del plano de masa***

Al tratarse de un parche cuadrado, tanto el largo como el ancho del plano de masa que se sitúa en su cara posterior, poseen la misma longitud. Por tanto, en este paso en el que se estudia cómo afecta su variación, se modifica únicamente el parámetro de simulación 'sustrato', que es el que controla la longitud del lado. El estudio se lleva a cabo dando valores al parámetro tanto por encima como por debajo del valor inicial de 65 mm.



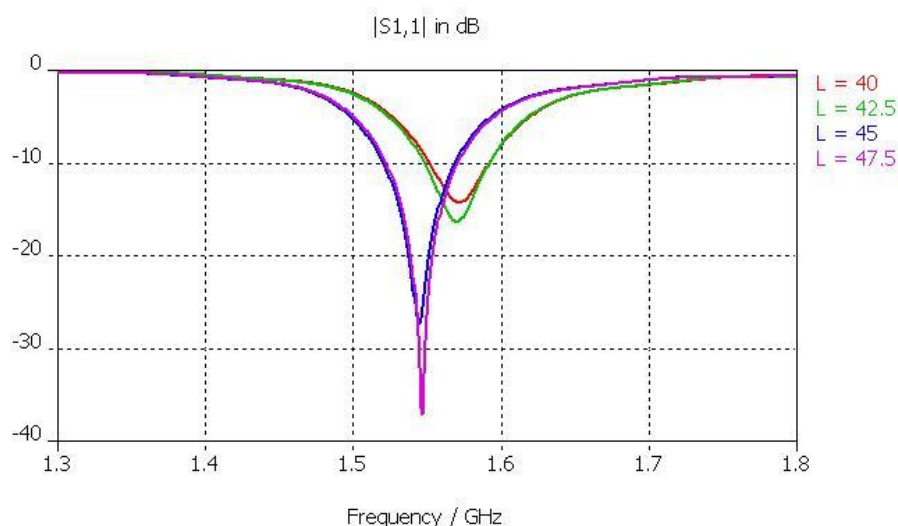
**Figura 14. Parámetro  $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a la simulación de un parche para Galileo con diferentes tamaños de plano de masa**

De estas curvas se puede resaltar el desplazamiento producido en la frecuencia de resonancia ocurrida si se disminuye el plano de masa hasta los 50 mm de lado. Pero esta variación no es posible aplicarla, pues el lado del sustrato (y en consecuencia, el plano de masa) debe tener en torno a  $6 \cdot h$  veces más tamaño que el parche como vimos en la ecuación 2.2. Además, se observa también una desadaptación, por lo que se en pasos posteriores, se procede a la modificación de las dimensiones de la metalización, manteniendo fijas las del plano de masa con su valor inicial.

#### ***c) Efectos producidos por las dimensiones del parche metálico***

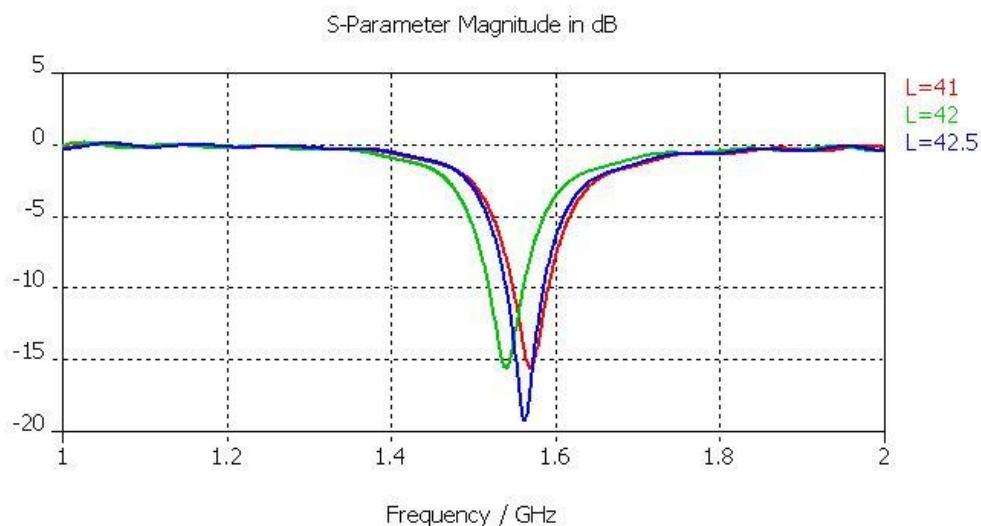
Al igual que ocurría en el paso anterior en el que se estudiaban los efectos del plano de masa sobre la antena, en el caso de modificar la dimensión del parche metálico, se varía únicamente un parámetro, pues posee una geometría cuadrada. En este caso será 'L' obteniendo las siguientes simulaciones:





**Figura 15. Parámetro  $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a la simulación de un parche para Galileo con diferentes tamaños del parche metálico**

Se aprecia que si la longitud del parche está comprendida entre los 40 mm y los 42.5 mm de lado, se consigue que la antena esté adaptada y resuene en frecuencias próximas a los 1575 MHz correspondientes a la frecuencia central de la banda-L1 del sistema Galileo. Por este motivo, a continuación se simula de nuevo el parche con valores en ese intervalo de frecuencias:



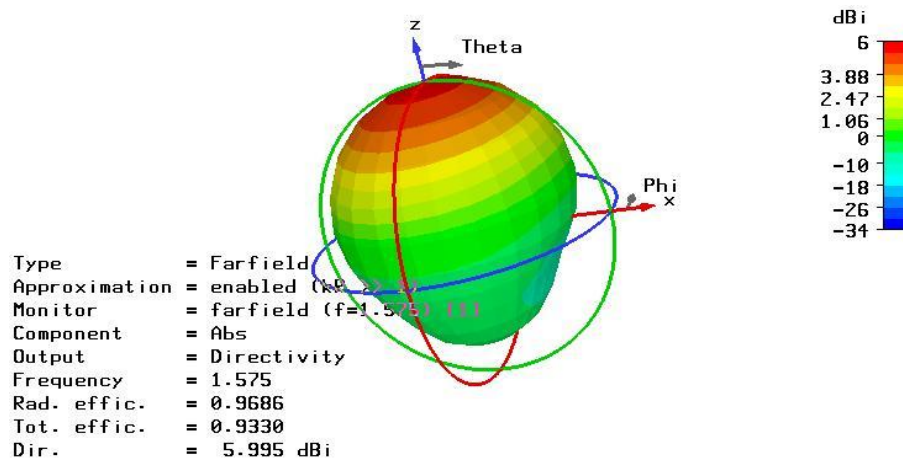
**Figura 16. Valores de longitud del parche metálico que consiguen adaptar la antena en torno a la frecuencia de resonancia.**

Dado el valor  $L = W = 41$  mm, la antena opera entre los 1551 MHz y 1592 MHz (banda del 2,6%). Esta banda se aproxima a la banda L1 de operación del sistema Galileo, por lo que las dimensiones finales para el modelo son: parche = 41 x 41 mm, y sustrato (plano de masa) = 65 x 65 mm.

De esta manera, se consigue un parche de reducidas dimensiones que cubre las necesidades planteadas al comienzo del capítulo. A continuación, se pasa a detallar la información referente al diagrama de radiación del parche diseñado.

### 2.2.3 Diagrama de radiación y distribución de campo del modelo final

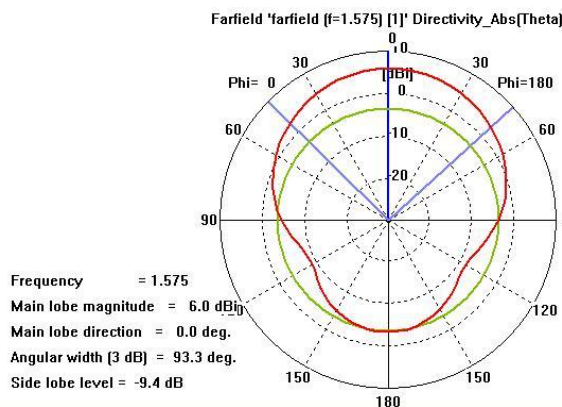
Aparecen a continuación diferentes figuras con el objetivo de mostrar el comportamiento de la antena tanto en radiación como en distribución de campo. En primer lugar, se muestra el diagrama de radiación en tres dimensiones:



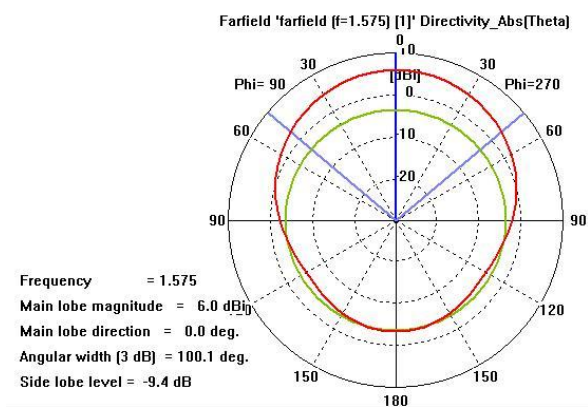
**Figura 17. Diagrama de radiación simulado en 3D a la frecuencia central del parche Galileo (1575 MHz)**

Se observa un diagrama de tipo pincel, cuya dirección de máxima radiación (eje Z) es perpendicular al plano que formaría el techo del coche donde iría ubicada la antena (plano XY). Esta configuración llamada broadside es muy recomendable en antenas que reciben la señal de satélites como se explicó en apartados anteriores.

Para verlo con detalle se muestran a continuación cortes en coordenadas polares a la frecuencia de resonancia del diagrama de radiación:



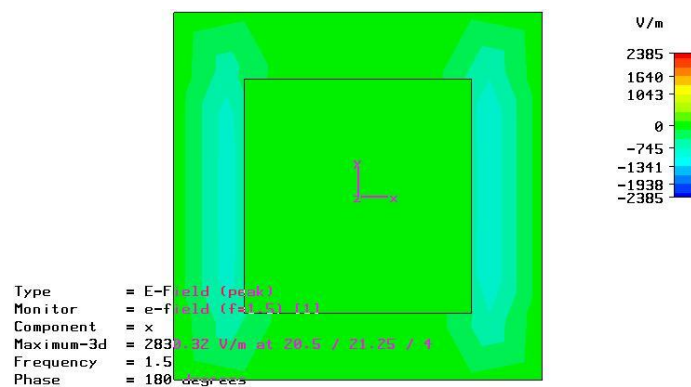
**Figura 18. Plano-E del diagrama a 1575 MHz**



**Figura 19. Plano-H del diagrama a 1575 MHz**

En la figura 18 se ve con claridad cómo radia más en  $\theta=0$ , que corresponde con el eje Z. Si se observa también desde otro plano de corte como en la figura 19, queda reflejado el diagrama de tipo pincel.

Además, se presenta en la siguiente figura la distribución del campo eléctrico en el parche a 1500 MHz.



**Figura 20. Distribución del módulo de la componente 'x' del campo E en el parche Galileo (vista frontal)**

En la figura se aprecia la componente 'x' del módulo del campo y cómo éste desborda dentro del parche dando lugar a la radiación electromagnética a la que se hacía referencia antes.

Este estudio, da lugar a continuación a otro en el que se modifica el tipo de antena impresa, utilizando un monopolo plano debido a las características de radiación del estándar de telefonía GSM. Al recibir la señal desde estaciones base situadas en la superficie terrestre, ya no se necesitará un diagrama de tipo broadside, sino omnidireccional.

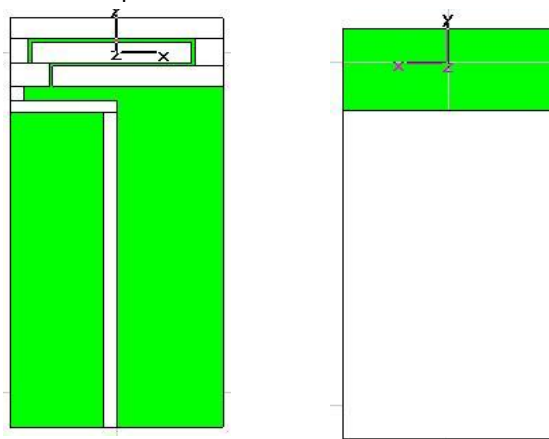
## 2.3 Diseño y estudio de antena para telefonía móvil 2G (GSM)

En este apartado, se parte de un diseño ya publicado en [14] que sirve de punto de partida en el análisis paramétrico que se va a llevar a cabo con el fin de obtener una antena que trabaje en las bandas de operación GSM en Europa: GSM900 (890 – 960 MHz) y GSM1800 (1710 – 1880 MHz).

### 2.3.1 Diseño del modelo de antena GSM

El elemento radiante propuesto en el modelo original de [14] es una metalización rectangular formada por dos "brazos", uno externo y otro interno. Éste va fotograbado sobre un sustrato FR4 de grosor 0.4 mm, permitividad relativa 4.4 y dimensiones 30 x 60 mm que se alimenta mediante una línea microstrip de 50Ω de impedancia de entrada terminada en un puerto de guíaonda.

El sustrato lleva un plano de masa en la cara posterior de 30 x 48 mm en su parte inferior, que no llega a cubrir al elemento radiante. Éste se presenta a continuación:



**Figura 21. Modelo inicial de referencia diseñado para operar en las bandas de GSM**

La parametrización propuesta consta de los siguientes valores en milímetros:

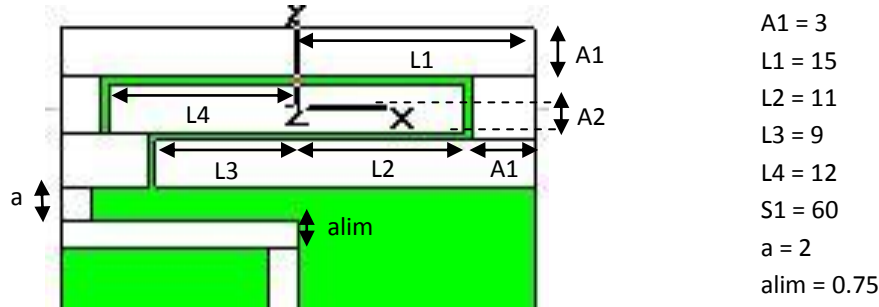


Figura 22. Parametrización del diseño inicial de antena GSM

El largo total de la antena es de 60 mm, que aún siendo pequeña, se va a buscar más adelante la forma de reducir su tamaño, de manera que pueda ir instalada en un radomo pequeño en forma de “aleta de tiburón”. Esta longitud de antena queda controlada por el parámetro ‘S1’ en la simulación, que posteriormente se modificará para estudiar su efecto sobre la antena.

Un hecho importante a tener en cuenta a la hora de diseñar, es el ancho que va a tener la línea que alimenta la antena, pues el puerto de guíaonda debería “ver” a su entrada una impedancia de 50  $\Omega$ . El motivo de imponer este valor, es que la mayoría de los sistemas de telecomunicación actuales (salvo en la TV, donde lo habitual son 75  $\Omega$ ) poseen una impedancia de entrada de 50  $\Omega$ . El parámetro que controla el ancho de la línea es ‘alim’, y para un grosor inicial del substrato de 0.4 mm, tendrá un valor de 0.75 mm. (En el cálculo de este valor se ha usado la herramienta disponible en el simulador para cálculos analíticos de impedancias de línea).

### 2.3.2 Análisis paramétrico del modelo de antena para GSM

Si se lleva a cabo la simulación con el valor de los parámetros propuestos en [14], se obtiene la siguiente curva de adaptación en la que al igual que en el apartado anterior se considera la antena adaptada a una determinada frecuencia si sus pérdidas de retorno son inferiores a -10 dB.

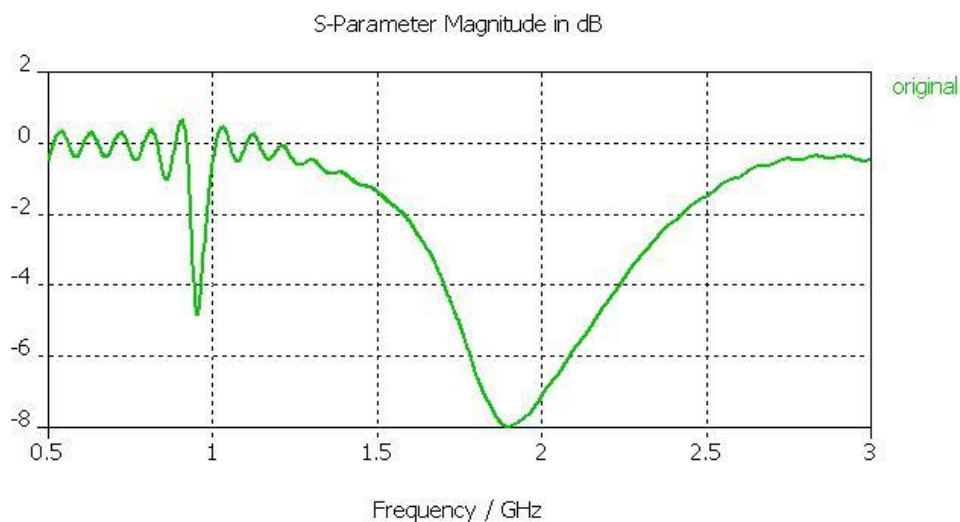
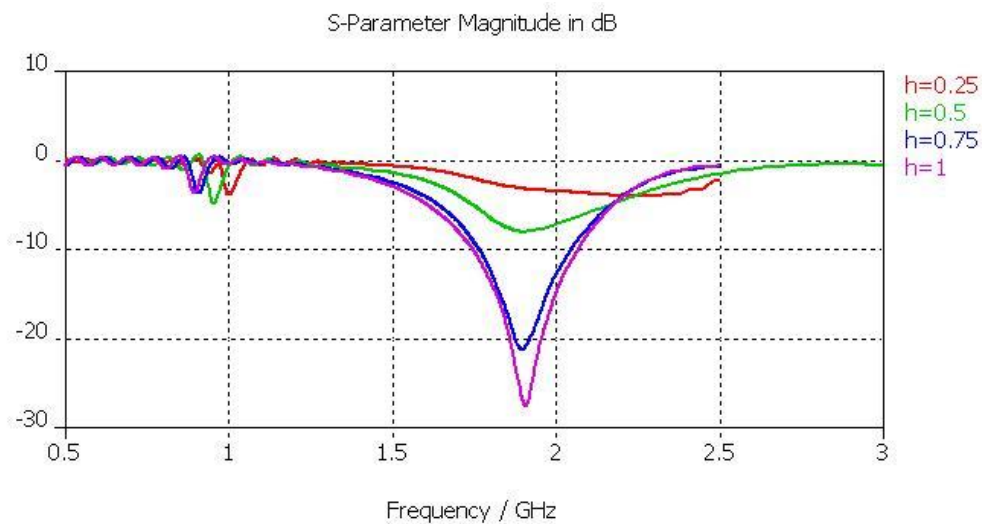


Figura 23. Curva de adaptación tras simular con el valor original de los parámetros del diseño de referencia

En ella, se aprecia cómo la antena posee una doble resonancia: una en 900 MHz y otra en 1800 MHz (coincidentes con las de GSM), pero sin embargo en esas frecuencias está poco adaptada, pues posee pérdidas de retorno importantes, sobretodo en la banda inferior, donde se aproximan a los -5 dB. Habrá que conseguir por tanto en los pasos sucesivos, mejorar la adaptación de nuestro modelo, llevando a cabo el método de modificación de los parámetros más significativos usado en el apartado anterior. En primer lugar, se va a estudiar cómo afecta el grosor del sustrato a la curva de adaptación. (Aunque no suele ser una variable de diseño, se quiere conocer cuál es su efecto).

#### a) Efectos producidos por variaciones en el grosor del sustrato

El primer parámetro a modificar en el modelo inicial será el que controla el grosor del sustrato y, en consecuencia, se va a modificar también el ancho de la línea de transmisión que alimenta, debido a la relación directamente proporcional que existe entre ambos parámetros. Por tanto, se presentan a continuación las simulaciones con los diferentes valores de grosor, no incluyéndose los cálculos de la medida de la línea (Estos cálculos no aparecen en el presente documento por facilitar la lectura del mismo, pero se han llevado a cabo en cada una de las simulaciones que vienen a continuación):



**Figura 24. Parámetro  $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a la simulación de la antena GSM frente a variaciones en el grosor del sustrato**

En la figura se modifica el grosor por encima y por debajo del valor inicial de 0.4 mm. Se observa una desadaptación en la banda inferior en todas las curvas, además de producirse también en la banda superior para valores de grosor menores de 0.5 mm. Sin embargo, si este valor supera los 0.5 mm, las frecuencias superiores sí se adaptan. Por ejemplo, aislando la curva correspondiente a un grosor de 1 mm en una gráfica (figura 25), la banda superior cubre las frecuencias comprendidas entre 1750 MHz y 2070 MHz, dando lugar a una banda del 16,8%. Sin embargo, la banda inferior no se consigue adaptar, teniendo pérdidas en torno a -3.5 dB.

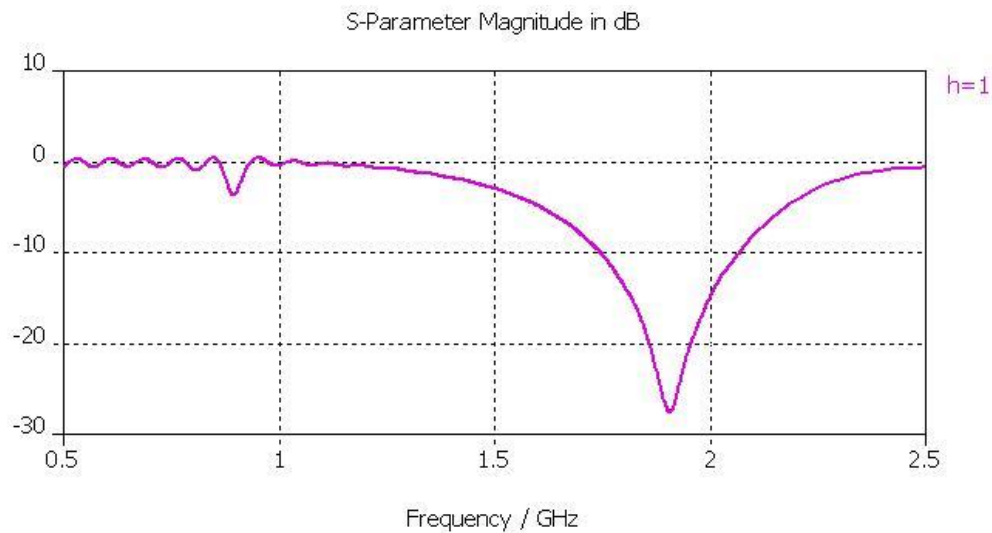


Figura 25. Parámetro  $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a un grosor de sustrato de 1 mm

**b) Efectos producidos por el ancho del “brazo externo”**

Se estudia el efecto producido en el comportamiento electromagnético de la antena debido a la variación del ancho del brazo externo, modificando su valor entre los 3 mm que tiene el modelo original y los 5 mm. Para ello, se llevan a cabo cinco simulaciones sucesivas:

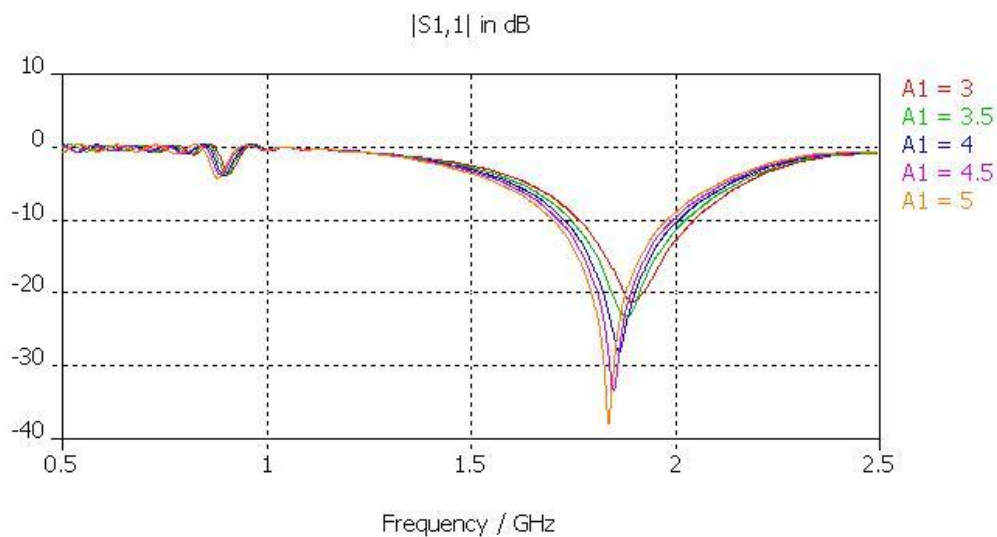


Figura 26. Parámetro  $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a la simulación de la antena GSM para distintos anchos del brazo externo de la antena

El efecto que introducen estas variaciones son cambios en la adaptación y en la frecuencia de resonancia de la banda superior. Se observa que a medida que aumenta el ancho, se consigue desplazar la frecuencia de resonancia a valores inferiores. En el caso de aumentar su ancho hasta los 5 mm, la antena queda adaptada en las frecuencias de operación coincidentes con las del estándar de telefonía GSM1800 (1710 – 1880 MHz). Por tanto, establecemos un nuevo valor de ancho del brazo externo, aumentándolo hasta los 5 mm. El siguiente paso será la modificación del ancho del “brazo interno”.

### c) Efectos producidos por el ancho del "brazo interno"

En este caso se modifica el ancho del brazo interno con el fin de conocer su efecto sobre la antenna. Este valor lo controla el parámetro 'A2', por lo que se llevan a cabo simulaciones sucesivas haciendo variar este parámetro. Las cinco curvas que se presentan a continuación en la figura 27, tienen en común la adaptación de la banda superior, pero no así en la banda inferior. Este efecto es similar que en el caso del brazo externo. Aún así, se observa una pequeña diferencia y es que si se centra la atención en la banda inferior, se aprecia una ligera mejora en la adaptación a medida que aumenta el ancho del brazo y también una traslación de su frecuencia central, alejándose de los 900 MHz en los que debería operar si se espera que pueda servir para cubrir el servicio de GSM900.

En consecuencia, en el estudio de la antenna que continúa en páginas posteriores, se mantendrá el valor original de los anchos de brazo tanto interno como externo ( $A_1 = 3 \text{ mm}$  y  $A_2 = 1.5 \text{ mm}$ ).

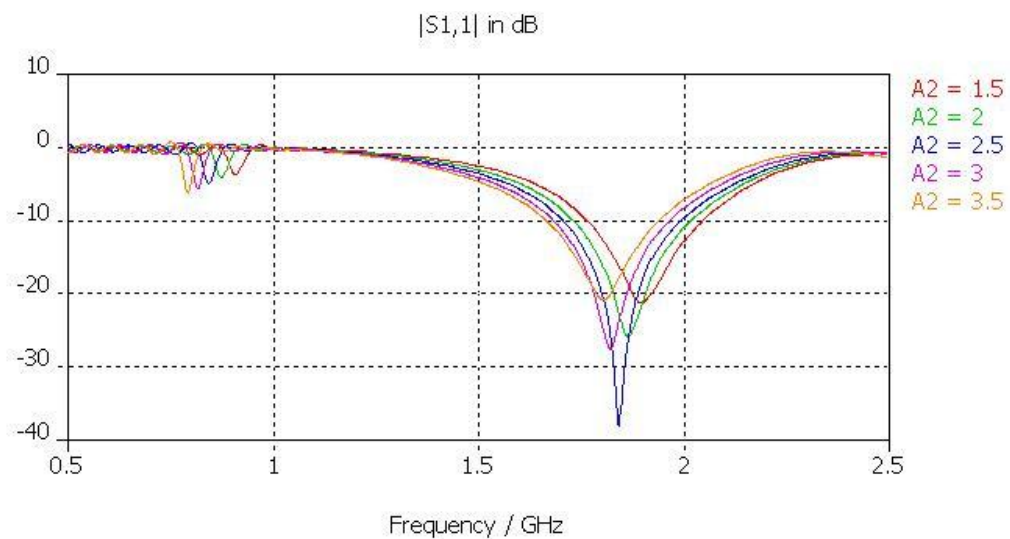
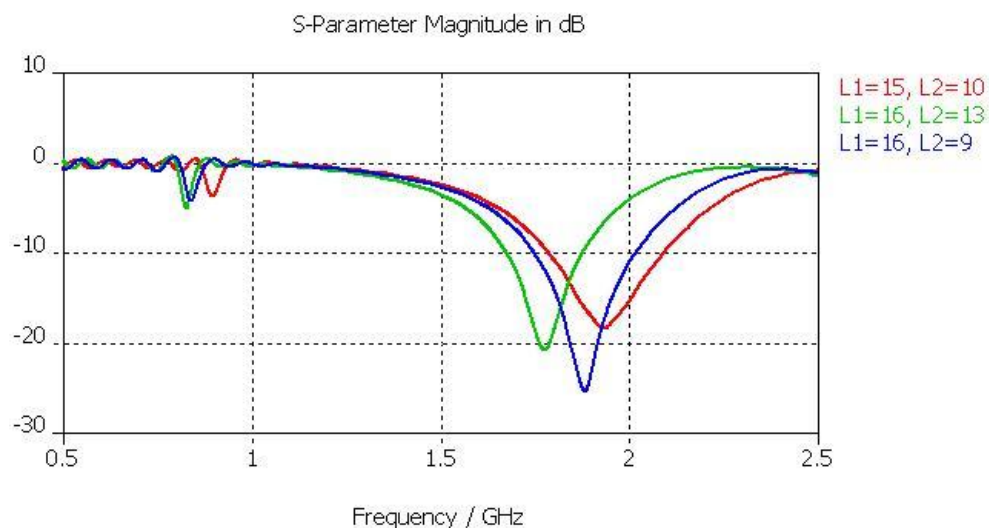


Figura 27. Parámetro  $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a la simulación de la antenna GSM para distintos valores del ancho del brazo interior de la antenna

### d) Efectos producidos por la longitud de los brazos

Se continúa el estudio de los parámetros modificando esta vez la longitud de "los brazos" que forman el elemento radiante. El objetivo es mejorar la adaptación de la banda inferior de frecuencias obtenida en simulaciones anteriores, pues la superior se adapta con mayor facilidad. La longitud de los brazos queda controlada a través de los parámetros 'L1' y 'L2', que se modificarán conjuntamente. El resultado de dichas variaciones se presenta a continuación en las siguientes simulaciones:





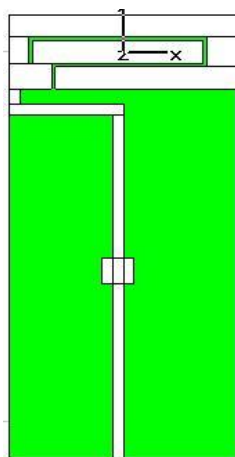
**Figura 28. Parámetro  $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a la simulación de la antena GSM para diferentes longitudes de los brazos**

Se observa un comportamiento similar al de pasos anteriores, en el que la banda superior queda adaptada, mientras que la inferior continúa con pérdidas de retorno que impiden que se adapte. Lo que sí se aprecia al agrandar la longitud de los brazos hasta  $L1=16$  mm y  $L2=13$  mm, es que se vuelve a conseguir adaptar las frecuencias comprendidas entre los 1652 MHz y los 1890 MHz, de manera que la banda de operación del estándar GSM1800 quedaría cubierta.

En cuanto a la banda inferior, se llega a la conclusión de que con el tipo de antena impresa utilizado, es complicado adaptarla, de manera que se debe buscar otra vía distinta a la de la modificación de los parámetros de la antena. Por ello, a continuación se procede a la utilización de un stub en la línea de alimentación para comprobar si es posible adaptar esa banda.

#### ***e) Efectos producidos al introducir un stub de adaptación***

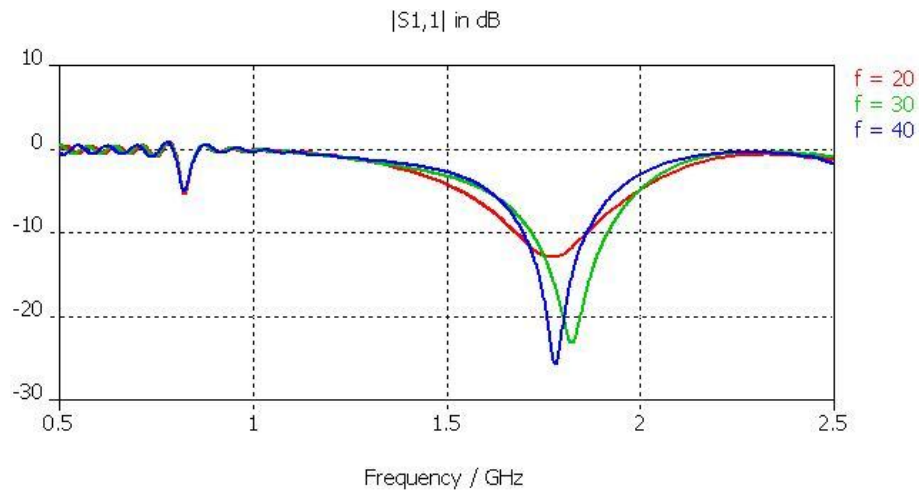
Con el propósito de adaptar la antena en su banda inferior de operación, se introduce un stub en la línea de alimentación. Se presentan por tanto varias simulaciones con dicho stub en función de su ubicación, quedando el modelo de la siguiente manera:



**Figura 29. Antena GSM propuesta con stub de adaptación**



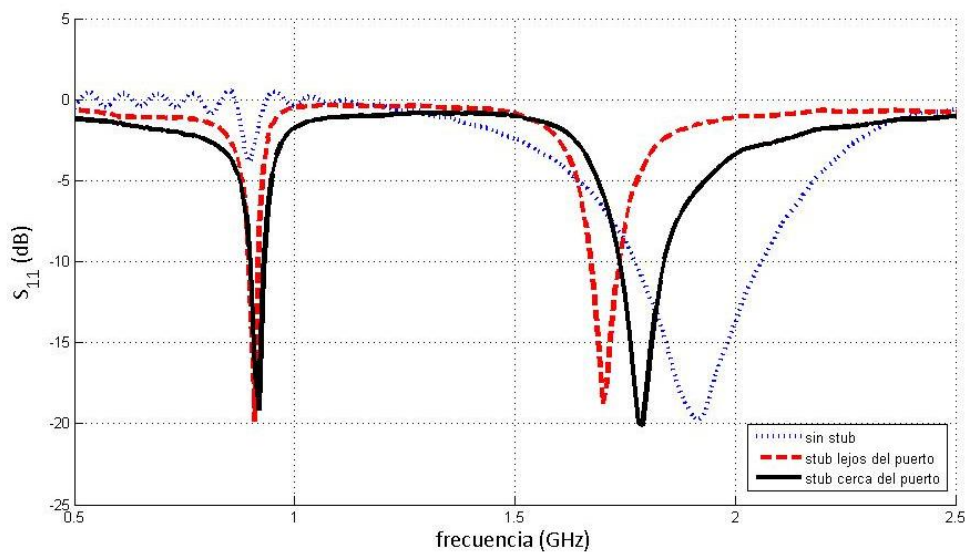
Este stub debería influir más o menos en la adaptación de la antena según su situación respecto al puerto de alimentación. Esta distancia, queda controlada por el parámetro 'f' que se modifica hasta conseguir tres curvas de adaptación correspondientes a tres ubicaciones distintas del stub:



**Figura 30. Parámetro  $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a la simulación de la antena GSM para diferentes posiciones del stub de adaptación**

En la figura se observa cómo la banda inferior no se ve alterada por el efecto del stub, aunque sí la superior, que mejora su adaptación a medida que alejamos el stub del puerto de alimentación. Aún así, nos pareció interesante el modelo y se mandó fabricar para estudiar con más realismo el efecto de este stub sobre la antena.

Se llevarán a cabo dos medidas: una con el stub cerca del puerto de guíaonda, y otra lejos de él, obteniendo las siguientes curvas de adaptación que hemos querido comprobar con la obtenida en simulación.



**Figura 31. Curvas de adaptación resultantes al medir la antena y compararla con la simulación si se varía la distancia del stub respecto del puerto de alimentación**

Se observa en la figura que es posible adaptar tanto la banda superior de operación de una antena de tipo monopolo plano, como adaptar la banda inferior si se introduce un stub. En el caso de la antena propuesta en este apartado, se consigue que opere en doble banda compatible con el estándar de telefonía GSM en el caso de colocarlo cerca del puerto.

Y como estudio final, se presenta a continuación el diagrama de radiación y la distribución de campo de la antena propuesta en el paso anterior al estudio del stub, en el que se obtenía una curva de adaptación en la que la antena operaba en las bandas de GSM, pero únicamente se conseguía adaptar la banda superior.

### 2.3.3 Diagrama de radiación y distribución de campo del modelo propuesto para GSM

Se ha llevado a cabo la simulación de la antena propuesta en 2.3.2.d, de manera que se obtiene un diagrama de radiación en 3D de sus frecuencias de resonancia (900 MHz y 1800 MHz). En primer lugar, la banda inferior:

- $f = 900 \text{ MHz}$

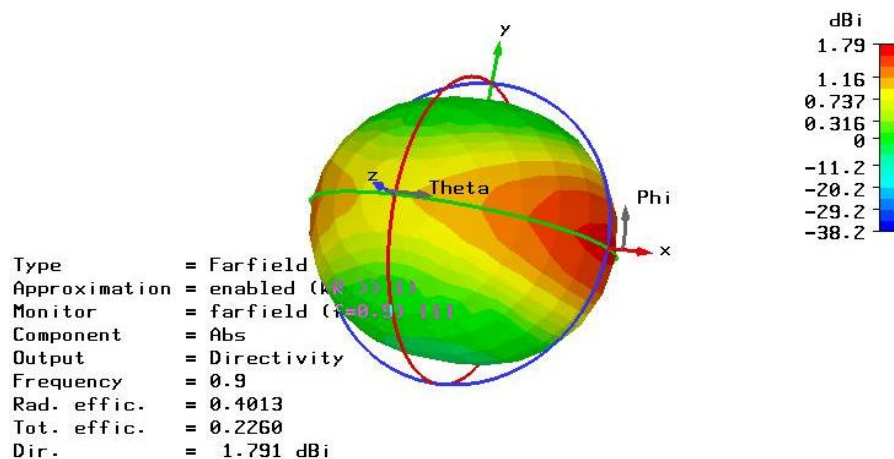


Figura 32. Diagrama de radiación en 3D a 900 MHz de la antena GSM

Si se observa la forma que tiene el diagrama de radiación, se deduce que en este caso la manera más conveniente de ubicar la antena en el coche, sería haciendo que el plano XZ de la antena fuese paralelo al plano de masa que formaría el techo del vehículo, haciendo que el diagrama alcance valores máximos precisamente en ese plano, siendo mínimo en la dirección perpendicular (eje Y). De esta manera, las antenas destinadas a dar servicio a equipos de telefonía móvil como es el caso, podrán captar la señal de cualquier estación base en cualquier dirección del plano XZ, que correspondería con la superficie terrestre en la que se ubican estas estaciones.

Para ver con mayor detalle este diagrama, se muestran a continuación planos de corte a 900 MHz en coordenadas polares:

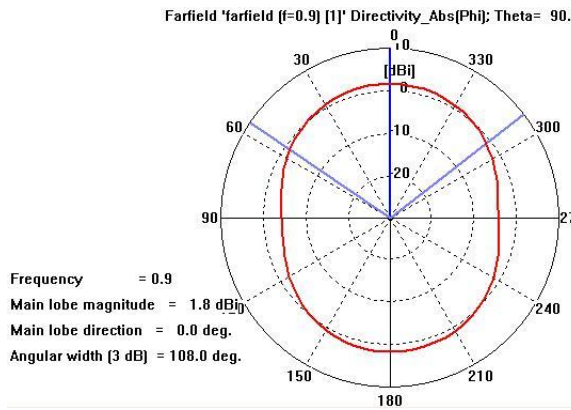


Figura 33. Plano XY a 900 MHz (corte en theta=90°)

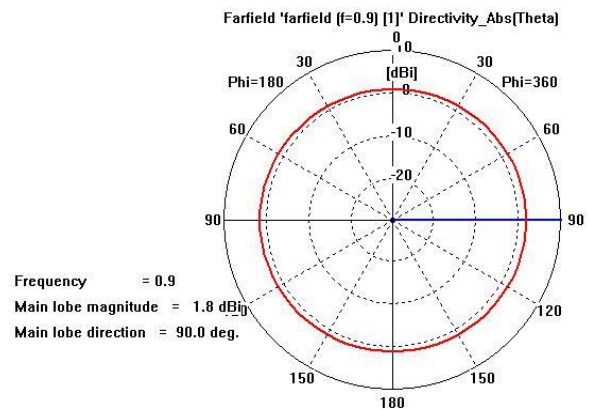


Figura 34. Plano XZ a 900 MHz (corte en phi=0°)

En la figura 33 se presenta el plano XY, donde se aprecia cómo el diagrama no radia por igual en todas las direcciones del plano. Esta característica debe tenerse en cuenta a la hora de orientar la antena, haciendo que el mínimo de radiación coincida con la dirección perpendicular al techo del coche. Y después, si se observa la figura 34, queda reflejado cómo en este caso sí radia en todas las direcciones del plano XZ.

En el caso de la frecuencia central de la banda superior, se observa un comportamiento parecido:

- $f = 1800 \text{ MHz}$

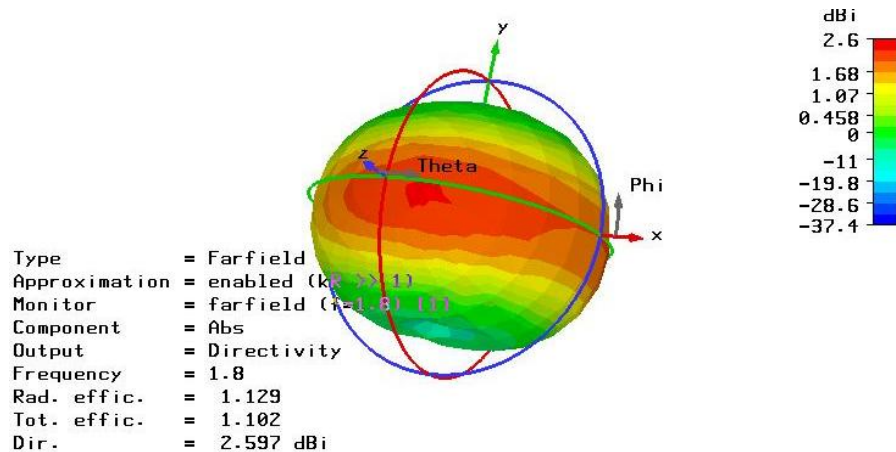


Figura 35. Diagrama de radiación en 3D a 1800 MHz de la antena GSM

De nuevo, se obtiene un diagrama de radiación en el que el máximo se encuentra en el plano XZ y el mínimo en el eje Y.

Para verlo con mayor detalle, se llevan a cabo los cortes del diagrama en coordenadas polares:

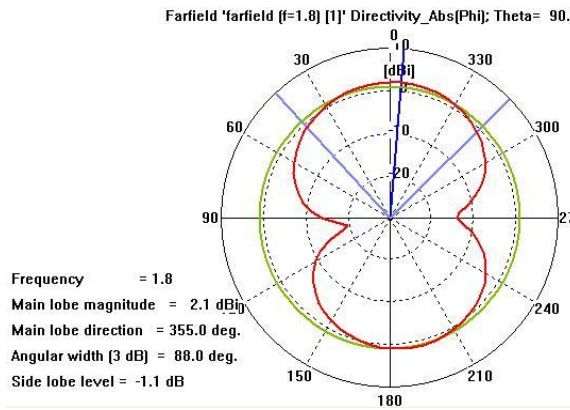


Figura 36. Plano XY a 1800 MHz(corte en theta=90°)

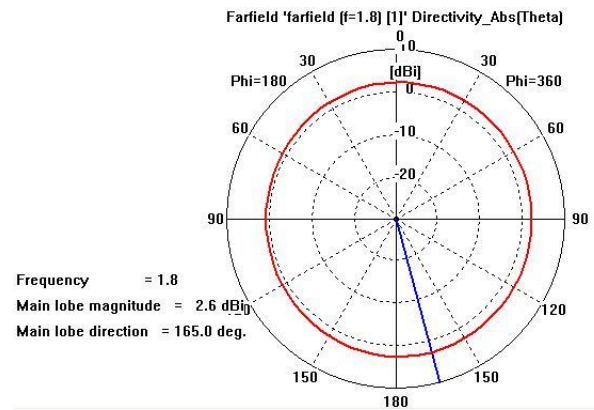


Figura 37. Plano XZ a 1800 MHz (corte en phi=0°)

En la figura 36 se presenta el plano XY, donde se aprecia cómo el diagrama no radia por igual en todas las direcciones del plano. Se observa además una pequeña diferencia respecto a su diagrama a 900 MHz, y es que los mínimos de radiación están más acentuados. Después, en la figura 37 sí radia en todas las direcciones del plano.

La distribución de campo en la antenna que se muestra a continuación, refleja cómo éste desborda entre los “brazos”, y cómo se distribuye a lo largo de la línea de alimentación. En primer lugar, se muestra en la frecuencia central de la banda inferior de GSM:

- $f = 900 \text{ MHz}$

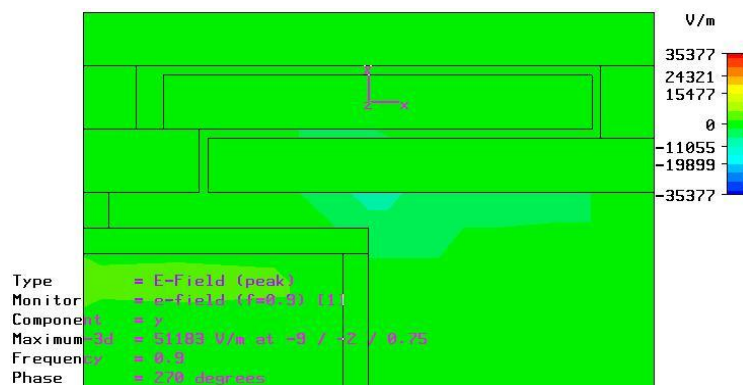


Figura 38. Distribución de campo a 900 MHz en la componente Y (vista frontal de la antenna)

En la figura 38 queda reflejada la distribución a 900 MHz correspondiente a la componente ‘y’ del campo eléctrico en módulo. Y en la siguiente, se quiere mostrar también para mayor información la componente ‘z’:

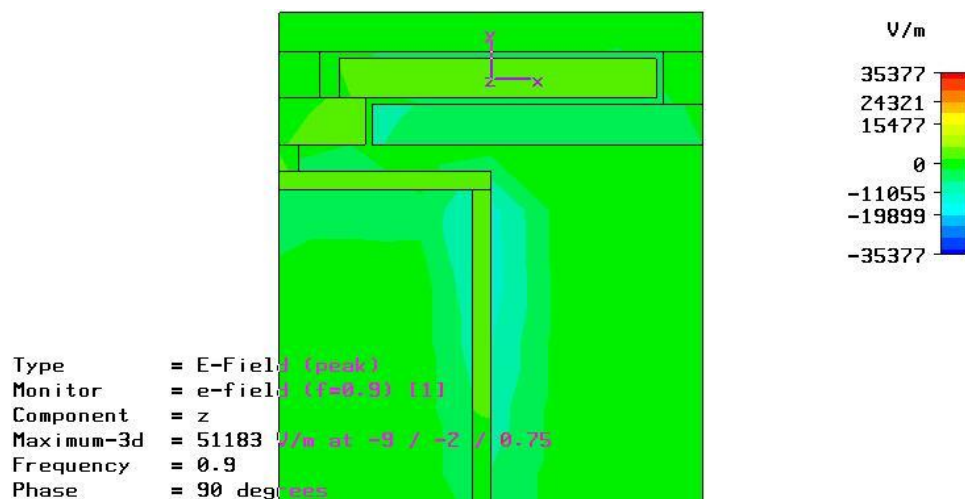


Figura 39. Distribución de campo a 900 MHz en la componente Z (vista frontal de la antenna)

▪ **f = 1800 MHz**



Figura 40. Distribución de campo a 1800 MHz en la componente Y (vista frontal de la antenna)

Al igual que en el caso de la distribución de campo a 900 MHz, queda reflejado cómo “escapa” ente las ranuras que forma este modelo.

Este efecto se produce también en la figura 41, donde se observa la componente ‘z’ del campo:

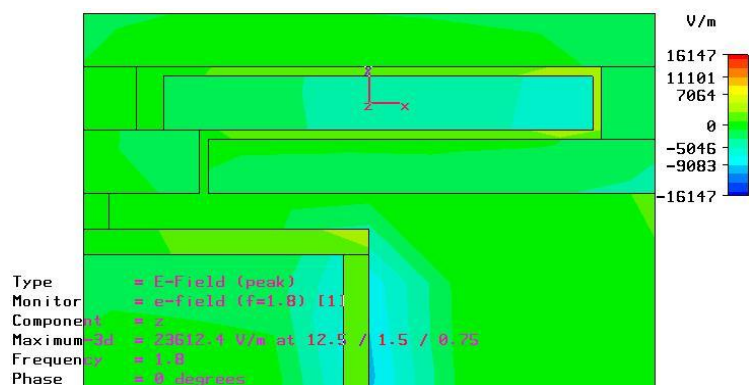


Figura 41. Distribución de campo a 1800 MHz en la componente Z (vista frontal de la antenna)

# Capítulo 3

## Antena en bandas GSM1800 - UMTS

### 3.1 Introducción al estándar de telefonía móvil UMTS

La tecnología UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) es un sistema de telefonía móvil de tercera generación que representa el conjunto de estándares diseñados con el objetivo de implantar redes nuevas que soporten mayor capacidad para la transmisión de datos en movilidad frente a sistemas anteriores. El desarrollo de la 3G supone la llegada de la banda ancha a las comunicaciones móviles.

Por tanto, teniendo en cuenta las posibilidades que es capaz de ofrecer UMTS, el próximo paso en este proyecto es diseñar una antena que de servicio en la banda de UMTS (1920 – 2170 MHz). Este servicio de comunicaciones estaba pensado en un principio para su uso en teléfonos móviles, aunque la red UMTS no está limitada a estos dispositivos. Se caracteriza por su elevada velocidad de acceso a Internet, que también permite transmitir audio y video en tiempo real; y una transmisión de voz con calidad equiparable a la de las redes fijas.

### 3.2 Diseño y estudio de antena para sistemas GSM1800 – UMTS – Bluetooth

En primer lugar, basándonos en un modelo ya publicado en [15] lo que se va a modelar es una antena cuyo objetivo es operar en las bandas: GSM1800 (1710 – 1880 MHz), UMTS (1920 – 2170 MHz) y Bluetooth (2402 – 2480 MHz).

#### 3.2.1 Diseño del modelo propuesto

La antena propuesta está compuesta de una metalización en forma de monopolo replegado que incluye unas pequeñas uniones y cuyo tamaño inicial es de 30 mm x 10 mm x 0.5 mm, a diferencia del modelo original que tiene un grosor de 2 mm (30 x 10 x 2 mm).

Este elemento radiante se sitúa sobre un sustrato FR4 rectangular de permitividad relativa 4.6 y con tamaño 76 mm x 38 mm x 0.5 mm. Además, se usa una línea microstrip de 50Ω para alimentarlo. En la

cara posterior del sustrato irá el plano de masa situado a una distancia de 1 mm por debajo del elemento radiante, teniendo unas medidas de 15 mm x 38 mm x 0.5 mm.

La geometría propuesta se presenta en la siguiente figura:

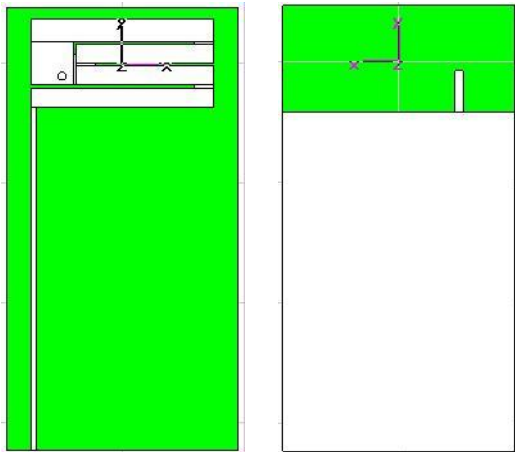


Figura 42. Modelo inicial de referencia para diseñar la antena

La particularidad de este diseño se encuentra en el saliente metálico que hay al borde del plano de masa en la cara opuesta de la antena. En su terminación se encuentra un “pin de corto”, que cortocircuita el plano de masa y el elemento radiante. El saliente metálico tiene unas medidas de 1.3 mm x 9.65 mm y se encuentra en la cara posterior de la antena junto al plano de masa.

La parametrización del modelo da lugar a los siguientes valores en milímetros:

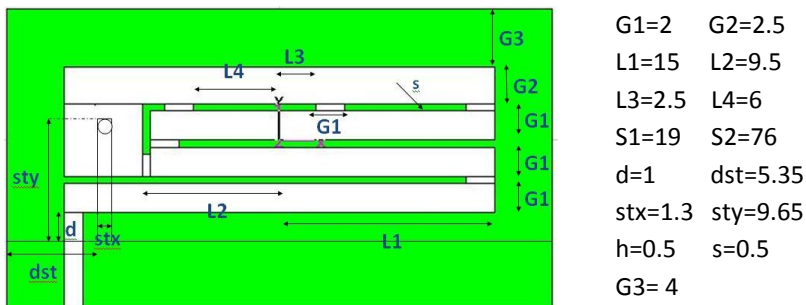


Figura 43. Parametrización del diseño inicial de antena

El largo total que tendrá la antena lo va a controlar el parámetro ‘S2’, que inicialmente tendrá un valor de 76 mm. Para alimentar la antena se usa un puerto de guíaonda a la entrada de la línea de alimentación.

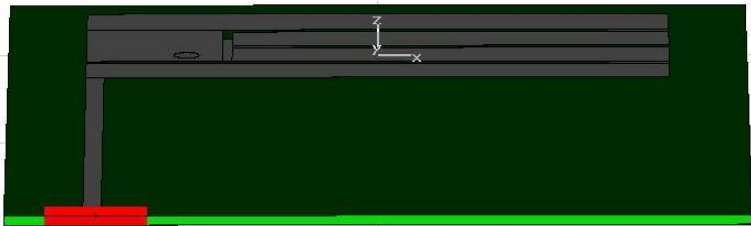


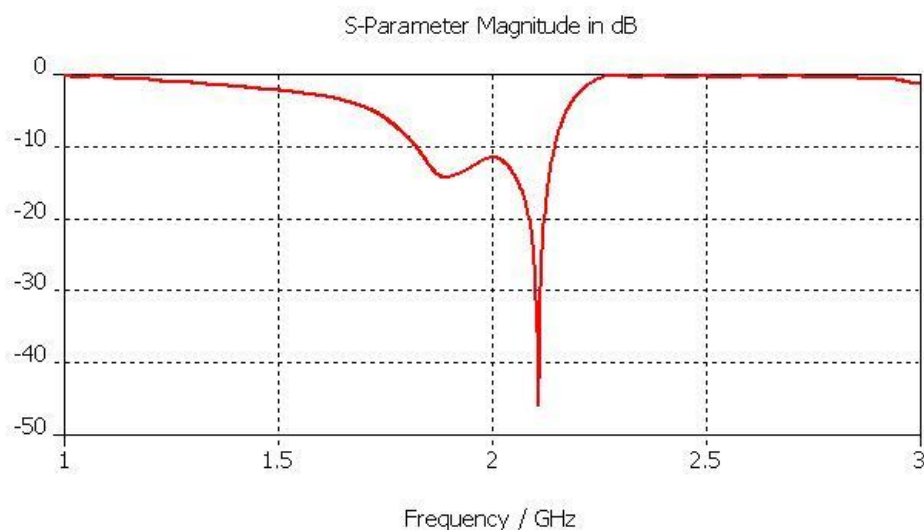
Figura 44. Puerto de guíaonda que alimenta la antena

Se debe tener en cuenta que el grosor de la línea que alimenta la antena debe ser el adecuado para que la línea tenga a la entrada una impedancia de  $50 \Omega$ , que es el valor más común en los sistemas de telecomunicación actuales (salvo en la TV). El parámetro que controlará este valor será 'alim' y para un grosor inicial del sustrato de 0.5 mm, tendrá un valor de 0.93 mm. Para calcular dicho valor, el simulador posee una herramienta que calcula analíticamente la impedancia de la línea.

### 3.2.2 Análisis paramétrico de la antena

En primer lugar, se simula el prototipo de referencia de la figura 42 usando las medidas originales de [15] en todos los parámetros salvo en el grosor del elemento radiante o metalización, que modificaremos de 2 mm a  $0.5 \mu\text{m}$  como se ha indicado anteriormente.

Al igual que en capítulos anteriores, las pérdidas de retorno máximas permitidas para que la antena esté adaptada serán de -10 dB.



**Figura 45. Curva de adaptación tras simular con los parámetros originales del diseño de referencia**

Se observa una curva de pérdidas de retorno en la que la antena resuena en dos frecuencias diferentes: 1.9 GHz y 2.1 GHz, dando lugar a una banda de 16.3% comprendida entre las frecuencias: 1.825 GHz – 2.15 GHz. La banda queda adaptada y cubre las frecuencias correspondientes al servicio UMTS.

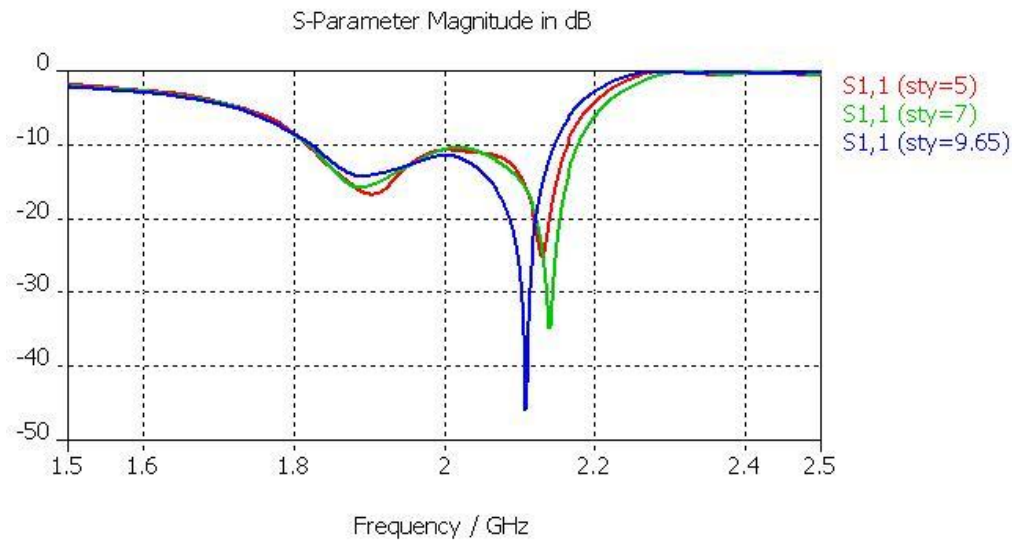
Con el fin de conseguir una antena capaz de abarcar otras dos bandas más (GSM1800/Bluetooth), se procede al estudio de la misma de igual forma que en capítulos anteriores, es decir, modificando las medidas del modelo original y comprobando cómo afectan al comportamiento electromagnético de la antena.

Se comienza con el estudio del elemento saliente del plano de masa en la cara posterior de la antena y que llamaremos en adelante: “península”.

#### **a) Efecto producido por la variación en la longitud de la “península”**

Primeramente, se modifica el parámetro 'sty' que controla la longitud del pequeño brazo metálico o “península” cuyo valor inicial es de 9.65 mm.



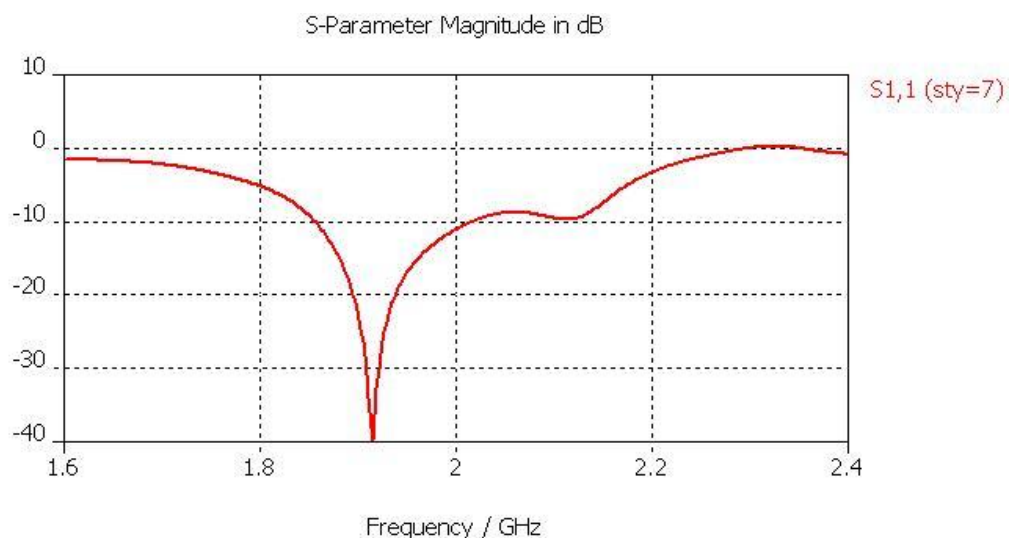


**Figura 46. Parámetro  $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a la simulación de la antena disminuyendo la longitud de la “península”**

Las pérdidas de retorno de este diseño, no provocan grandes variaciones ni en la frecuencia central ni en el ancho de banda de la banda inferior de operación. Sin embargo, en la banda superior sí influye, aumentándose el ancho en unos 40 MHz o en 20 MHz si se el valor es de 5 ó de 7 mm respectivamente. Además, se observan desplazamientos de la frecuencia central. De esta manera, el servicio UMTS queda cubierto por completo en cualquiera de los casos, aunque no así el servicio Bluetooth, pues la banda no llega a ser lo suficientemente ancha para ello. De todas formas, debido al aumento de banda que se produce, se fija el valor de 'sty' en los 7 mm para los diseños que vienen a continuación.

**b) Efectos producidos al modificar la distancia a la que se sitúa la “península”**

En línea con el estudio que se está llevando a cabo, se modifica la actual distancia que existe entre el extremo del sustrato y la “península”, dando lugar a la siguiente curva de adaptación si se iguala su valor con el valor de longitud de la misma (sty=dst=7mm):

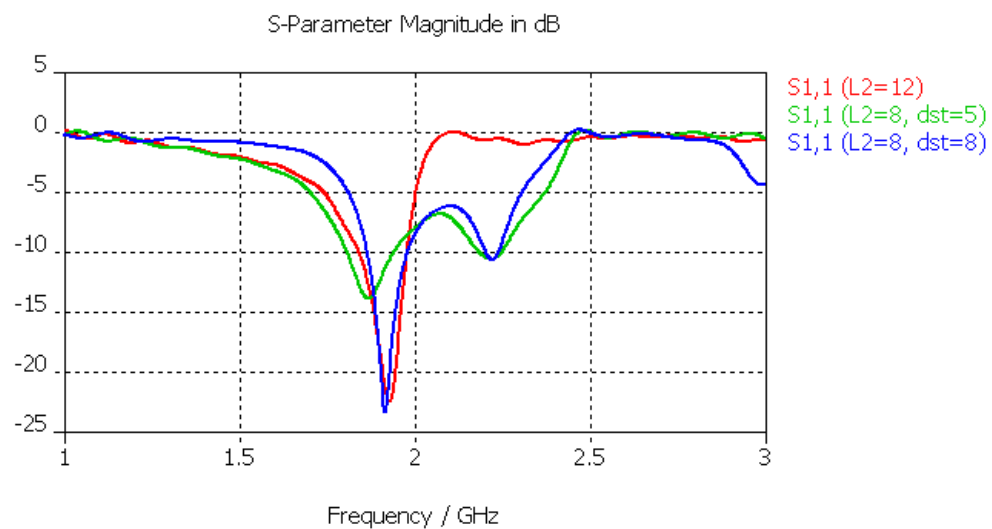


**Figura 47. Parámetro  $S_{1,1}$ [dB] resultado de la simulación de la antena con un valor de 7 mm para la distancia “península”- extremo de parche y para la longitud de la “península”**

Se observa ahora una mejor adaptación de las bandas inferiores que de las superiores. De esta manera, cambia la forma de la curva en relación con las simulaciones de los pasos anteriores. Por tanto, tras estudiar cómo influye este saliente metálico en el comportamiento de la antena, se debe proseguir con el objetivo de adaptar y agrandar la banda superior mediante el estudio de los parámetros de la antena usado en el capítulo anterior.

**c) Efectos producidos por la longitud del brazo principal que forma el elemento radiante**

Se modifica a continuación el largo del elemento radiante. Para ello, se debe tener en cuenta que es el parámetro 'L2' el que controla su longitud, por lo que estudiaremos su efecto analizando dos modificaciones como ejemplo: disminuirlo a 8 mm o aumentarlo a 12 mm:

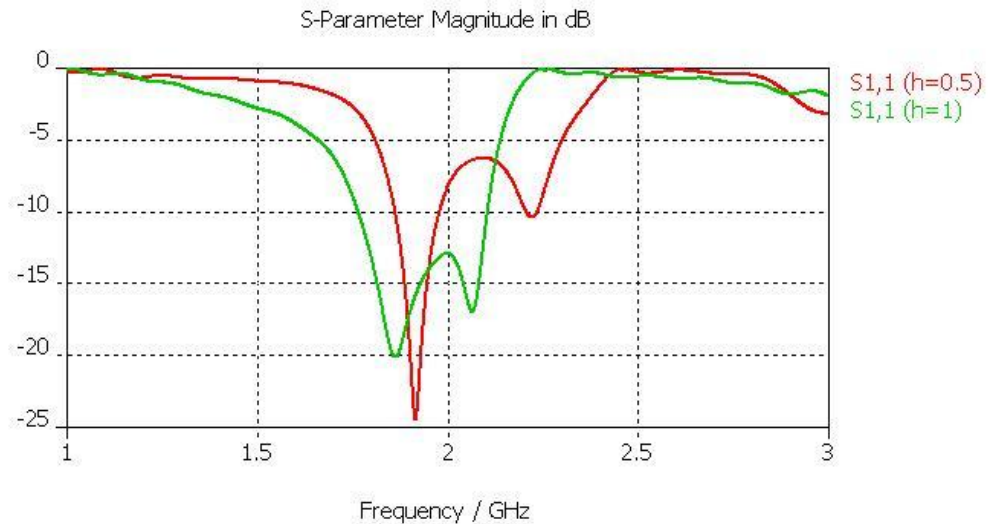


**Figura 48. Parámetro  $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a la simulación de la antena haciendo variar la longitud del elemento radiante**

Se producen cambios importantes en la forma de la curva de pérdidas según el valor de parámetro por el que optemos. En el caso de aumentar hasta los 12 mm, se produce un estrechamiento de la banda, de manera que esta variación queda descartada. Sin embargo, el resultado con  $L2 = 8$  mm y  $dst = 8$  mm consigue diferenciar y adaptar de manera más clara las dos resonancias, no variando en exceso la forma de la curva. Por tanto, se mantendrán estos valores en la antena en los próximos diseños que vienen a continuación.

**d) Efectos producidos por el grosor del sustrato**

En este caso, se estudia el efecto que produce sobre la antena modificaciones en el grosor del sustrato. Para ello, se duplica hasta 1 mm y se compara con el valor original, dando lugar a dos curvas: una correspondiente al valor propuesto al comienzo y otra al mismo valor, pero duplicado hasta los 1 mm.

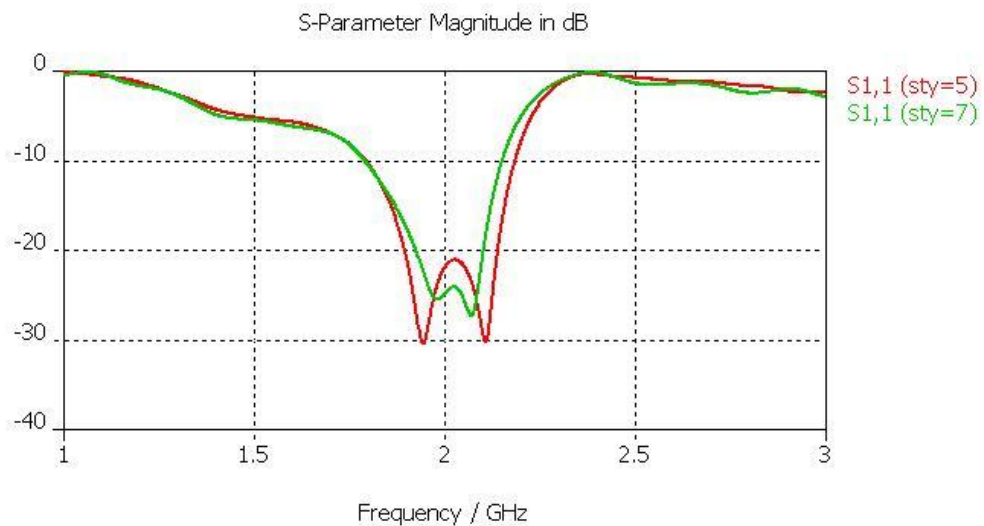


**Figura 49. Parámetro  $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a la simulación de la antena duplicando el grosor del sustrato**

Con esta variación, la antena aumenta su ancho de banda hasta obtener un 19,9%, operando entre 1.72 GHz – 2.1GHz, por lo que se aproxima mejor a las frecuencias de operación de GSM1800 (1.71 – 1.88 GHz) y UMTS (1.92 – 2.17 GHz). Se ha tenido en cuenta para el cálculo la relación directa entre el grosor del sustrato y el ancho de la línea de alimentación para tener una impedancia de 50  $\Omega$ , por lo que el parámetro ‘alim’ que controla el grosor de la línea, cambia su valor hasta los 1.85 mm. Se observa además un cambio en la adaptación de la banda superior, pues en este caso quedaría adaptada. Por tanto, se conserva el valor de este parámetro a 1 mm.

#### ***e) Efectos al modificar el ancho de los “brazos”***

Para comprobar qué efectos produce sobre la antena un aumento en el grosor de los elementos metálicos, se modifican los parámetros ‘G1’ y ‘G2’ encargados de controlar esta característica. Se aumenta 1 mm cada uno y se simula con distintos valores de ‘sty’, por lo que las gráficas que se muestran a continuación se centran en la variación de la longitud de la península, una vez aumentado el ancho de los brazos.

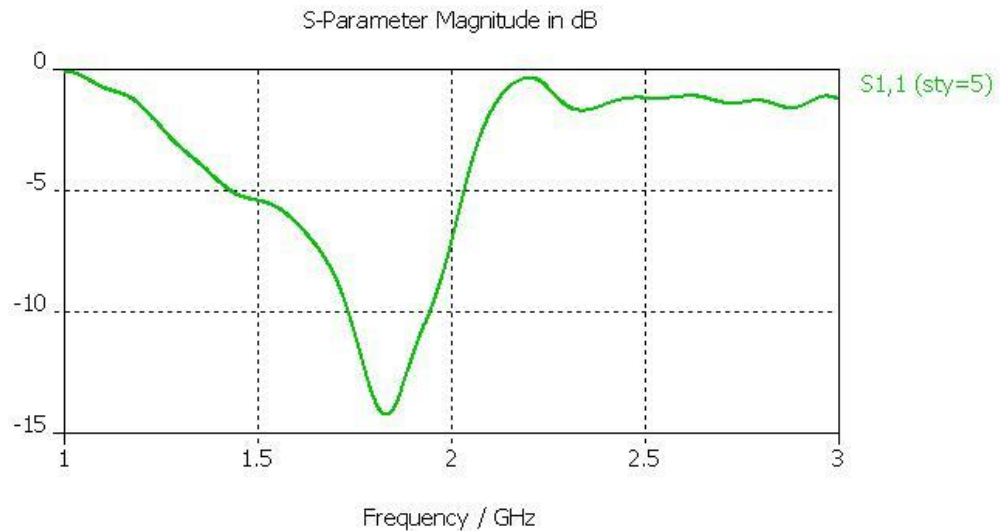


**Figura 50. Parámetro  $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a un aumento de ‘G1’ y ‘G2’ hasta los 3 y 3.5 mm respectivamente**

Se produce un ligero aumento de banda, además de adaptarse mejor la antena, por lo que se mantiene este aumento en el grosor en los brazos metálicos del elemento radiante, quedando sus parámetros con el siguiente valor:  $G1 = 3 \text{ mm}$  y  $G2 = 3.5 \text{ mm}$ .

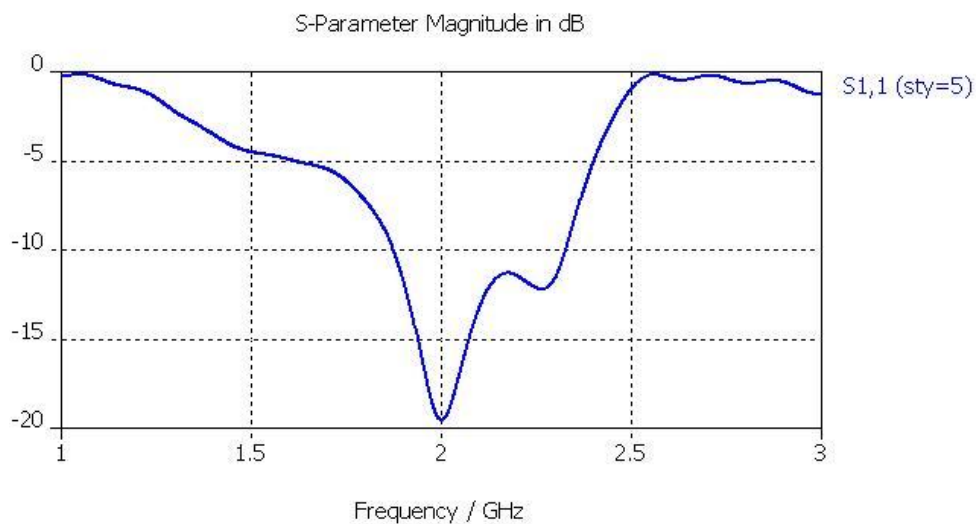
**f) Efectos producidos por una nueva variación en el largo de la metalización**

Se modifica de nuevo la longitud del elemento radiante, pero en este caso a través del parámetro 'L1' con el objetivo de conseguir un acercamiento a la banda de interés. En primer lugar, se aumenta el valor inicial situándolo en 18 mm y manteniendo  $sty=5 \text{ mm}$ .



**Figura 51. Parámetro  $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a la simulación de la antena con un aumento hasta los 18 mm la longitud del parámetro L1 del brazo**

Como muestra la figura, se produce un desplazamiento en la frecuencia central, pero también una disminución de su ancho de banda, de manera que en el paso siguiente, se lleva a cabo el proceso inverso, es decir, una disminución hasta los 13 mm:



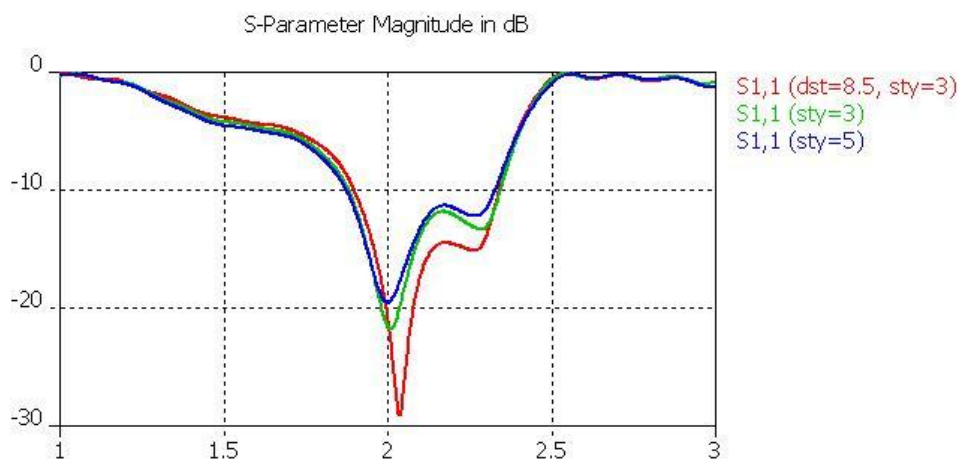
**Figura 52. Parámetro  $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a la simulación de la antena disminuyendo hasta los 13 mm la longitud del parámetro L1 del brazo**

Hay una mejor adaptación y una banda más ancha de un 21,5% (1877 – 2330 MHz), que cubriría el servicio de UMTS, aunque las frecuencias en las que opera GSM1800 (1710 – 1880 MHz) no.

Se debe por tanto buscar de nuevo un aumento del ancho de banda para que se pueda ofrecer el otro servicio con la antena propuesta. Haciendo uso del estudio llevado a cabo en el primer apartado en el que se comprobó que variando la longitud de la “península” se conseguía ampliar la banda de operación, se vuelve a modificar este parámetro.

#### **g) Efectos producidos por la variación del parámetro ‘sty’ (L1=13)**

Manteniendo el parámetro ‘L1’ en los 13 mm, se procede a la simulación de la antena con diferentes valores de longitud de la península. Para ello, se hace variar el parámetro ‘sty’ para estudiar de nuevo su efecto.

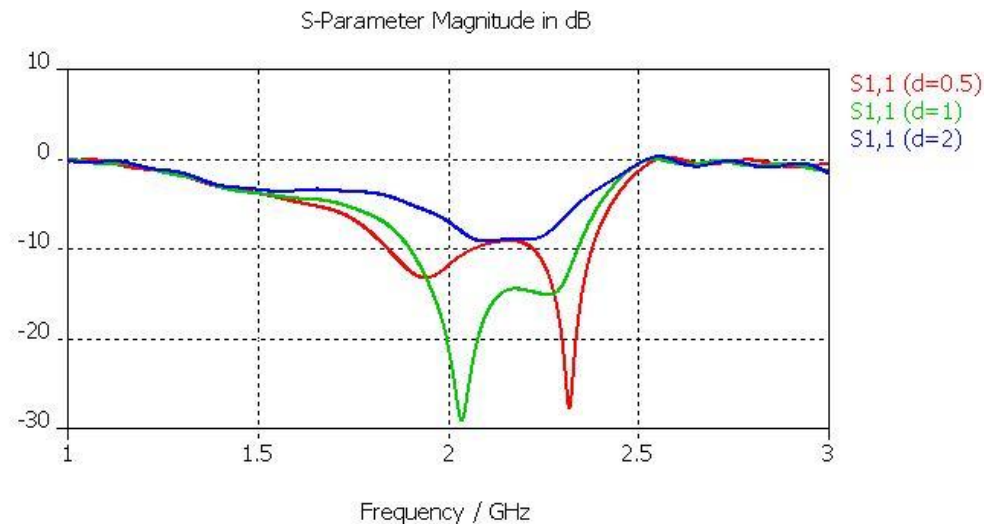


**Figura 53. Parámetro  $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a la simulación de la antena variando de nuevo la longitud de la península de la parte posterior, pero con longitud L1 de 13mm**

Al simular, se aprecia una mejor adaptación en el caso de disminuir hasta los 3 mm, manteniendo una distancia al borde de la antena de 8.5 mm. Aún así, no se produce un aumento en el ancho de banda, que en este caso se sitúa entre 1900 y 2340 MHz (20,8%) para la curva de adaptación de color rojo. Al no afectar esta nueva variación de ‘sty’, se continúa con el estudio.

#### **h) Efectos producidos por la variación del parámetro ‘d’**

El parámetro ‘d’ controla la distancia a la que se sitúa el plano de masa respecto al elemento radiante. Si se tiene en mente la fisonomía de la antena, se sabe que el plano de masa no cubre la totalidad de la cara posterior, sino que a 1 mm (valor del parámetro ‘d’) del elemento radiante se corta. Esto provoca que la antena opere como un monopolo plano y no como un parche como se explicó en el capítulo 1. A continuación, se muestran tres curvas correspondientes a la adaptación de la antena en función de esa distancia al plano de masa: una por debajo del valor actual, otra con el valor actual de 1 mm, y otra con un valor superior al actual.

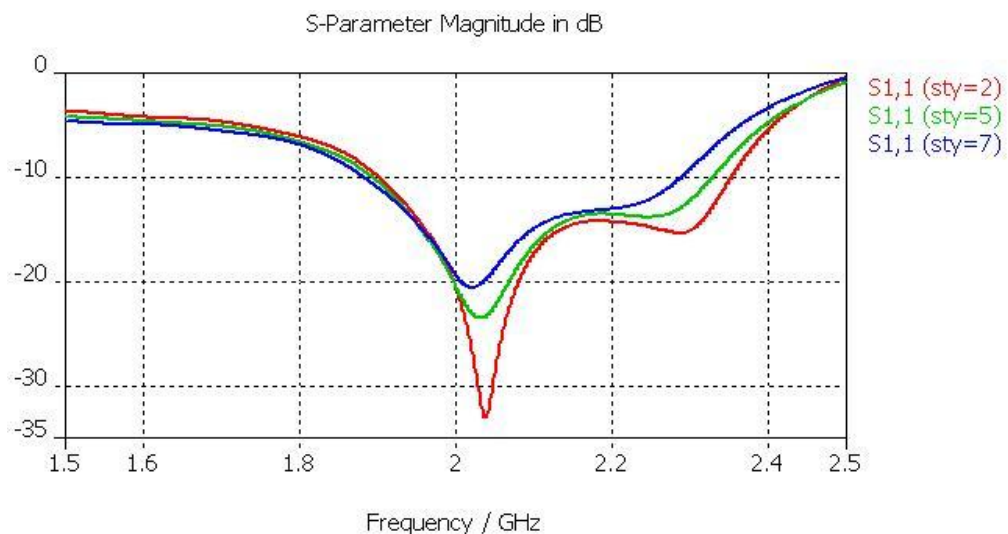


**Figura 54. Parámetro  $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a la simulación de la antena variando la distancia que separa el plano de masa con el elemento radiante**

Si se aumenta la distancia del plano de masa hasta los 2 mm (curva azul), la antena se desadapta. Sin embargo, si se opta por una disminución hasta los 0.5 mm, se observan mejoras en la adaptación de las altas frecuencias y peor en las bajas, justo al contrario que con  $d = 1$  mm. Por tanto, se mantiene el parámetro 'd' con su valor inicial de 1 mm, manteniéndose la forma de la curva que ha caracterizado la antena desde el principio.

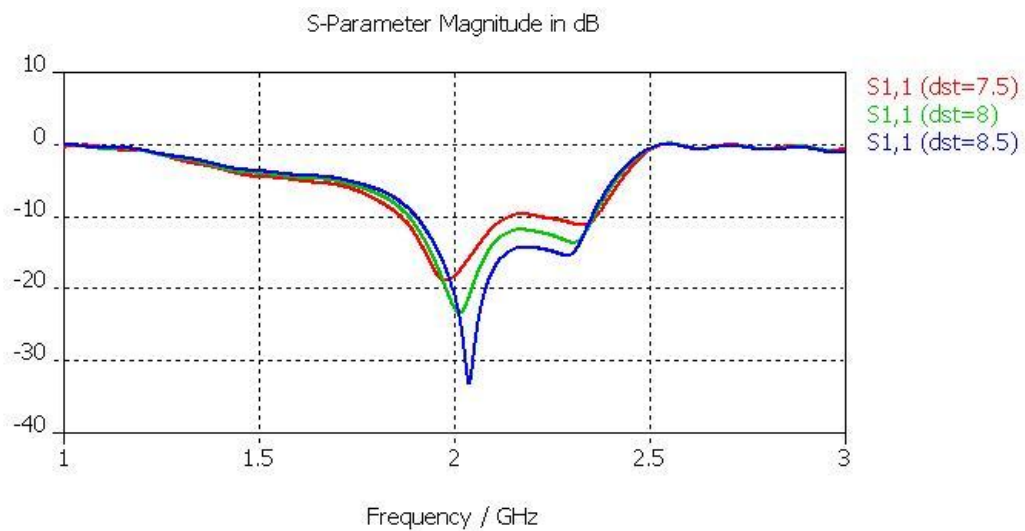
#### ***i) Nuevas variaciones en la ubicación y tamaño de la "península"***

Tratando de mejorar la respuesta de la antena, y viendo que los cambios más significativos vienen acompañados normalmente por variaciones en la "península", se vuelve a actuar sobre los parámetros 'sty' en un primer caso, y sobre 'dst' después, de manera que se obtienen dos conjuntos de curvas. En primer lugar, se presentan variaciones en la longitud de la península, dejando 'dst' constante con el valor de simulaciones anteriores: 8.5 mm:



**Figura 55. Parámetro  $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a la simulación de la antena variando 'sty' y manteniendo 'dst' constante a 8.5 mm**

Se consigue mejorar la adaptación y aumentar el ancho de banda al disminuir 'sty' de 3 mm a 2 mm. Por tanto, en el siguiente conjunto de curvas en el que se estudia el efecto de modificar la distancia que hay entre la península y el borde de la antena, se mantiene el valor de 'sty' en 2 mm:



**Figura 56. Parámetro  $S_{1,1}$ [dB] de la simulación de la antena variando el valor del parámetro 'dst' y manteniendo 'sty' constante en 2 mm**

A medida que va disminuyendo el valor de 'dst', la antena parece aumentar su ancho de banda de operación hacia frecuencias más bajas. Pero este fenómeno va acompañado también de una desadaptación progresiva hasta el punto de que cuando la distancia son 7.5 mm, se produce una disminución del ancho de banda, pues se cruza el umbral de pérdidas de -10 dB.

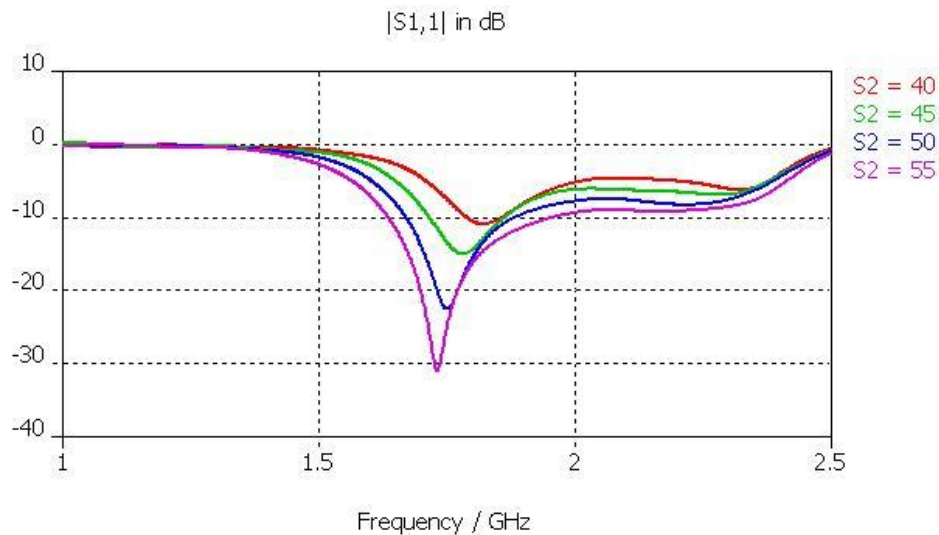
Tras analizar las diferentes curvas de adaptación obtenidas en las dos gráficas, se concluye que la mejor "combinación" será utilizar los valores sty = 2 mm y dst = 8.5 mm. Este resultado implica una banda muy ancha, ya que la antena opera entre: 1850 – 2350 MHz (23,8%). Sin embargo, queda claro lo complicado que resulta abarcar tres bandas de funcionamiento con este tipo de antenas planas, ya que aunque se posee un ancho de banda muy amplio, los servicios de radiocomunicación que se pretender cubrir, están muy distantes unos de otros. Por ejemplo, parece probable que con esta antena si tratamos de cubrir GSM1800 y UMTS, no podamos cubrir Bluetooth y viceversa.

Tratando de agrandar más aún la banda de operación y que pueda cubrir las frecuencias del servicio Bluetooth, se continúa con otro de los objetivos marcados al inicio del proyecto: diseñar una antena lo más pequeña posible. Para ello, se reducirá su altura con el fin de integrarla fácilmente en un radomo que irá ubicado en el techo de un coche.

#### ***j) Efectos producidos por la variación del tamaño de la línea de alimentación***

La antena se coloca de manera vertical en el techo del coche, por lo que se debe llevar a cabo una disminución en el largo de la antena para que quepa dentro del radomo. Inicialmente se sitúa en los 76 mm, pero se puede hacer más pequeña si se disminuye la longitud de la línea de alimentación. Como se indicó en el apartado 3.2.1 de Diseño, el parámetro que controla esta altura es 'S2', así que se llevarán a cabo distintas simulaciones, modificándolo entre los valores de 40 mm y de 55 mm.





**Figura 57. Parámetro  $S_{1,1}$ [dB] de la simulación de la antena disminuyendo la longitud de la línea de alimentación**

A medida que disminuye el largo de la antena, ésta comienza a desadaptarse y no se consigue agrandar en ningún caso el ancho de banda. Aún así, se va a establecer su valor en 50 mm para ver si se consigue una antena de estas dimensiones manteniendo la forma de la curva de adaptación, y sin desadaptarla en exceso.

Una vez establecido esta nueva configuración de la antena, como el comportamiento de la mayoría de parámetros de la antena ya se ha estudiado, se procede ahora a mejorar la adaptación realizando una optimización de algunos parámetros con el simulador.

### 3.2.3 Optimización de la antena propuesta

Con el fin de mejorar la respuesta electromagnética de la antena, se utiliza ahora el software de optimización que posee el simulador CST. Esta opción es recomendable en diseños en los que se necesitan ya pocas variaciones sobre la curva de pérdidas de retorno, pues se está próximo a una solución final.

Este software se encarga de optimizar el valor de los parámetros a estudio para así, conseguir acercarse a un valor establecido previamente. En nuestro caso, serán los parámetros G1 y G2, ya que en apartados anteriores lo único que se hizo con ellos fue aumentar en 1 mm su tamaño original. Así que ahora se comprobará si mediante la modificación de sus valores, es posible conseguir un ensanchamiento de la banda de operación de la antena que permita abarcar las frecuencias de funcionamiento del sistema Bluetooth.

La función objetivo que se marca es un umbral del parámetro  $S_{1,1}$ [dB], no pudiendo superarse en ningún caso los -10 dB entre las frecuencias de 1710 MHz y 2480 MHz, es decir, lo necesario para que la curva de adaptación del modelo original cubra GSM1800/UMTS/Bluetooth.



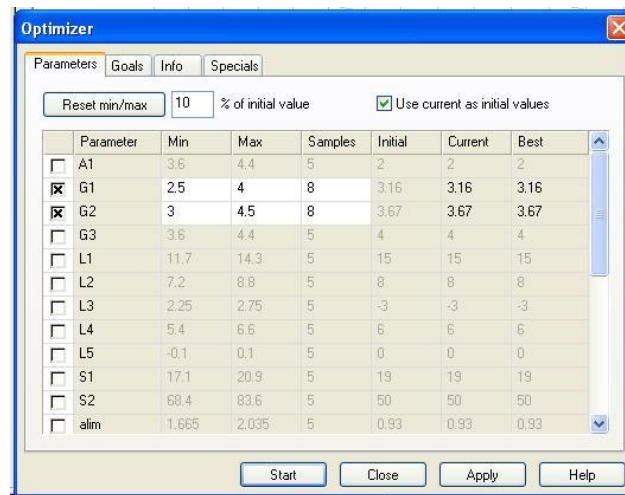


Figura 58. Apariencia del optimizador proporcionado en el software de CST

Tras la optimización, el simulador concluye que los valores de 'G1' y 'G2' más adecuados con los que se conseguiría cubrir las frecuencias objetivo serían  $G1=3.16$  mm,  $G2=3.67$  mm. Sin embargo, son valores muy próximos a los que tenían antes de la optimización, por lo que a la hora de simular la antena con estos valores, no se obtuvo ningún efecto significativo en su comportamiento.

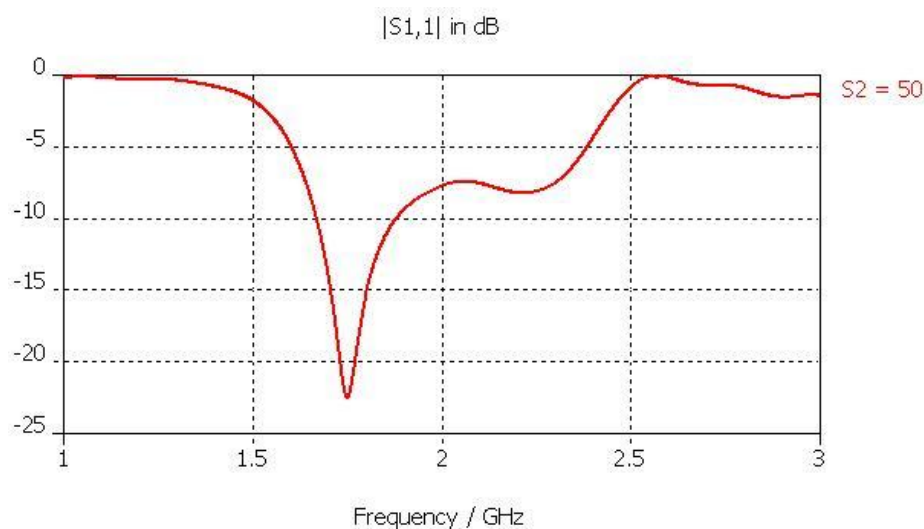
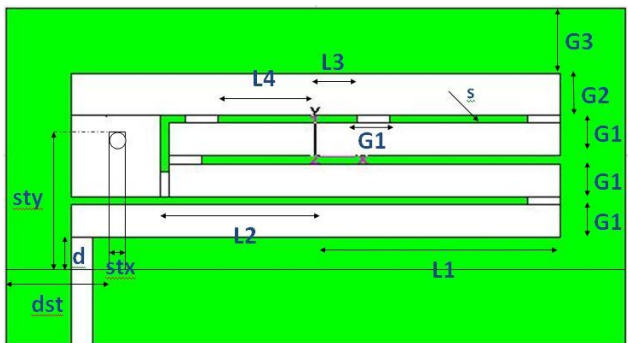


Figura 59. Parámetro  $S_{1,1}$ [dB] de la simulación de la antena tras la optimización

Debido a la complejidad que supone que una antena de tipo monopolo plano abarque estas tres bandas, se modifica el objetivo marcado en este capítulo, y se trata en los apartados que vienen a continuación de conseguir una antena que opere únicamente en GSM1800 y UMTS. De esta manera, se podría disponer de dos servicios de radiocomunicación con una única antena, evitando así la colocación de dos antenas en el coche.

### 3.3 Diseño y estudio de antena en doble banda para los servicios GSM1800 – UMTS

#### 3.3.1 Diseño del modelo propuesto



Se introducen variaciones en el valor de los parámetros del modelo anterior a fin de conseguir la antena en doble banda deseada, quedando los siguientes:

$G1=3.16$	$G2=3.67$	$G3=4$
$L1=13$	$L2=8$	$L3=2.5$
$L4=6$	$S1=19$	$S2=50$
$d=1$	$stx=1.3$	$sty=2$
$h=1$	$s=0.5$	$dst=8.5$

Figura 60. Nueva configuración de los parámetros para la antena en doble banda que sustituirá a la anterior

#### 3.3.2 Análisis paramétrico de la antena en doble banda

Se parte del último diseño propuesto en el apartado anterior (3.2.3.j), en el que se llevó a cabo una disminución en el tamaño de la línea de alimentación con el objetivo de reducir el tamaño de la antena. La curva de adaptación que sirve de punto de partida en este apartado es por tanto la siguiente:

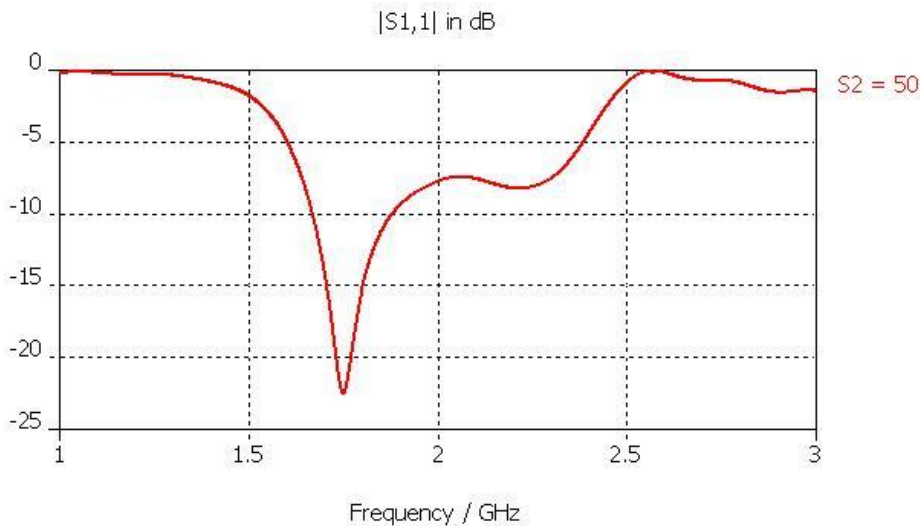


Figura 61. Parámetro  $S_{1,1}$ [dB] correspondiente al apartado 3.2.3.j y que sirve de punto de partida en este nuevo apartado

Los parámetros optimizados junto a la disminución en el largo de la antena, han provocado una desadaptación de la banda de operación deseada. Para alcanzar el nuevo objetivo y adaptar la banda superior se modificarán los parámetros, llevando a cabo un estudio de aquellos más importantes.

### a) Efectos producidos por la variación del grosor del sustrato

En primer lugar, se estudia el comportamiento de la antena frente a variaciones en el grosor del sustrato. Para ello, se llevan a cabo modificaciones por encima y por debajo del valor inicial de 1 mm, dando lugar a la siguiente figura:

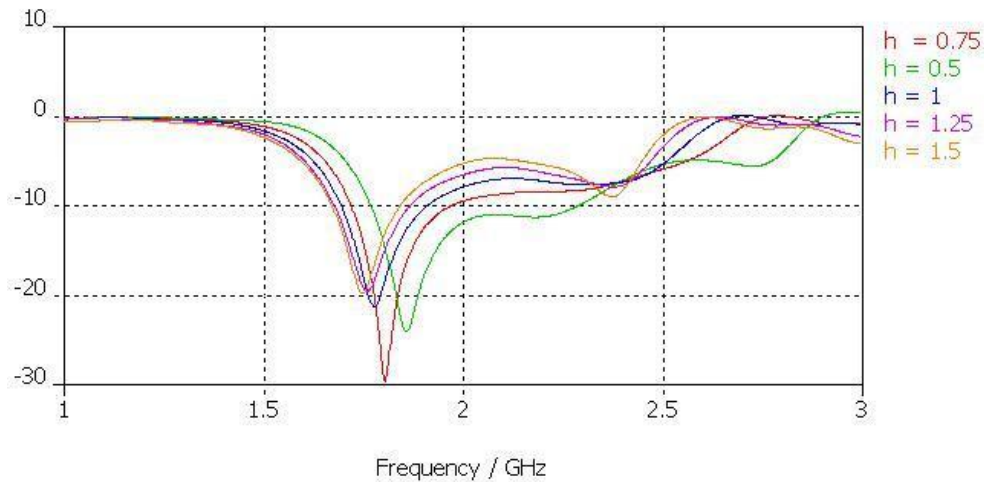


Figura 62. Parámetro  $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a la simulación de la antena de doble banda con distintos grosores de sustrato

En ella se observa que al reducir el grosor a la mitad ( $h = 0.5$  mm), se produce mejor adaptación que con otros valores, apareciendo una tercera resonancia cercana a los 2700 MHz. En este caso, la banda de operación se adapta para las frecuencias comprendidas entre 1770 MHz – 2280 MHz, es decir que posee una banda del 25,2%. Con esta configuración, la antena puede dar servicio en la banda de UMTS (1920 – 2170 MHz), pero todavía no cubre la banda completa de GSM1800.

Para mayor detalle, se extrae de la figura anterior, la curva correspondiente a un grosor de 0.5 mm.

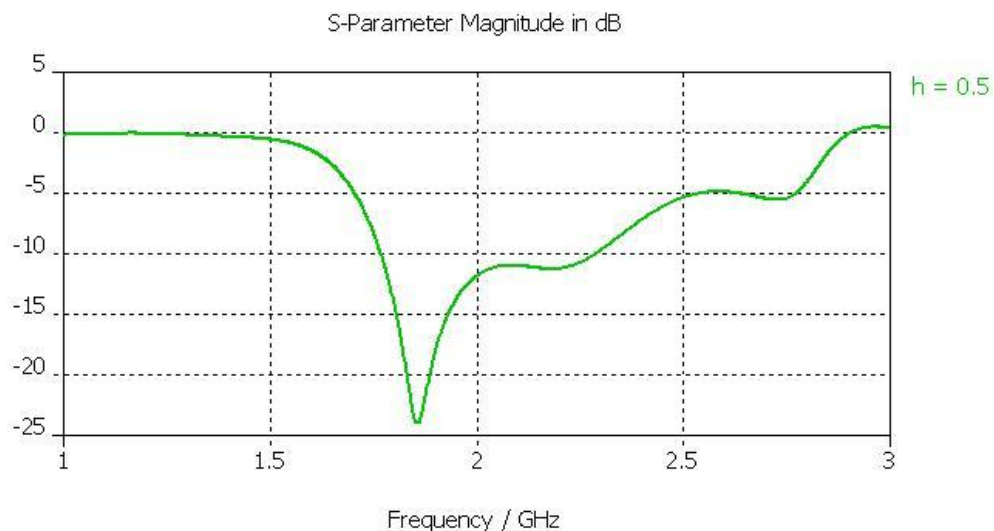


Figura 63. Parámetro  $S_{1,1}$ [dB] de pérdidas correspondiente a la simulación de la antena de doble banda con un grosor de sustrato de 0.5 mm

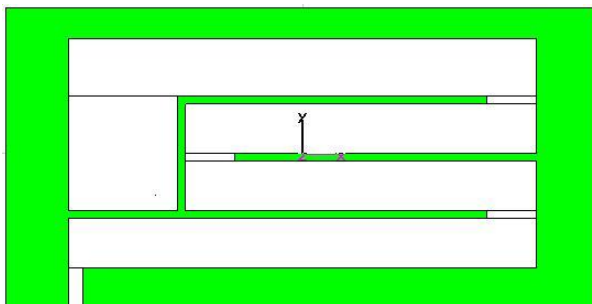
La tercera resonancia que aparece en frecuencias superiores, no está bien adaptada.

Lo que se propone a continuación va a ser una modificación en el diseño físico de la antena.

Se eliminan las pequeñas muescas de unión que conectan las distintas secciones del “brazo”, con el fin de estudiar el efecto que sobre ésta tienen.

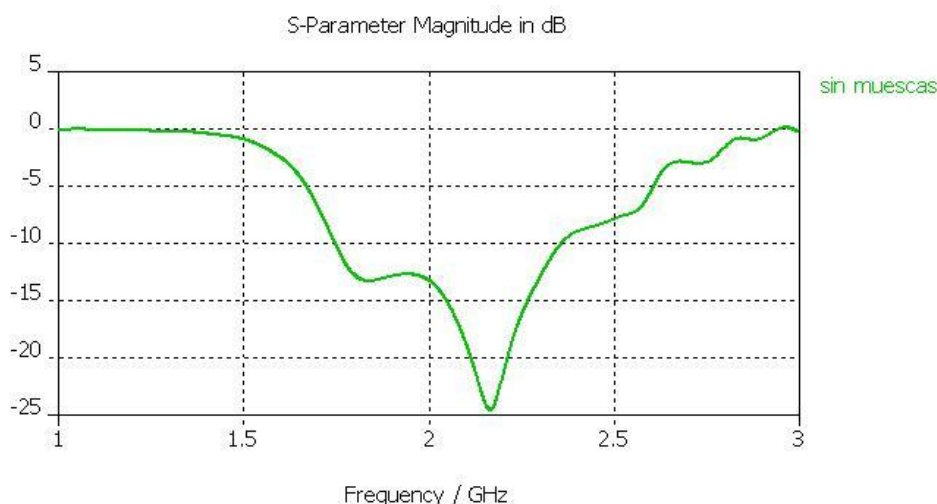
#### ***b) Efectos producidos por las muescas de las antena***

Como consecuencia del cambio de diseño por eliminar las muescas, la antena presenta el siguiente aspecto de monopolo replegado:



**Figura 64. Modificación en la antena original. Eliminación de muescas**

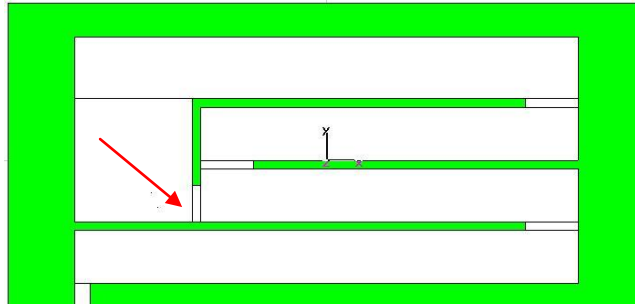
En él se aprecia un único “brazo” cuyo extremo final se ha replegado hasta dejarlo cerca del extremo inicial. Para conocer las frecuencias en que trabaja la antena, se obtiene a continuación la curva de adaptación, correspondiente al parámetro  $S_{1,1}$ [dB] de pérdidas de retorno de este nuevo diseño:



**Figura 65. Parámetro  $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a la simulación del nuevo diseño de la antena de doble banda: sin muescas de unión entre “brazos”**

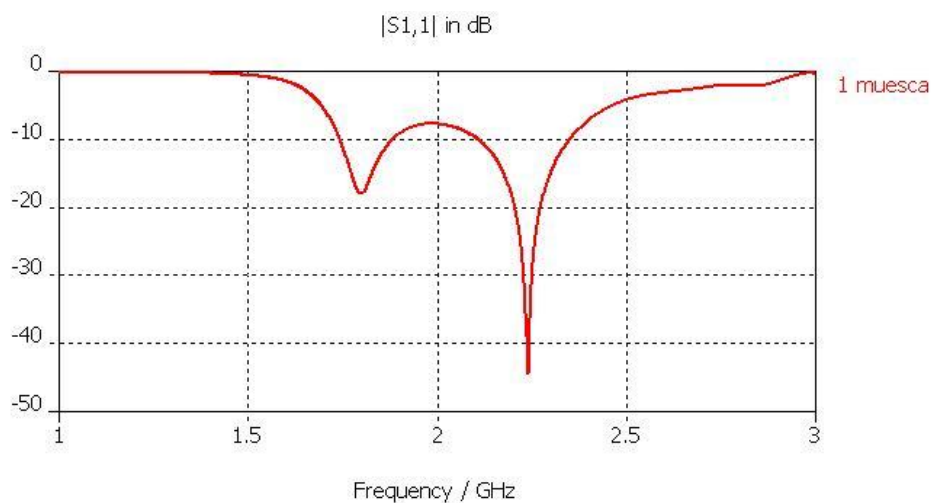
La curva que resulta tiene la particularidad de ser contraria a la anterior en el sentido en que la resonancia a frecuencias altas ha mejorado su adaptación. Además, la banda de operación comienza en 1750 MHz, por lo que se ha conseguido desplazar dicha banda, aunque sin conseguir cubrir de momento todas las frecuencias deseadas. Se observan incluso múltiples resonancias en altas frecuencias, pero en las que la antena no está adaptada y que, por tanto, no deberían influir en su comportamiento.

Por ello, en vez de eliminar por completo las muescas del elemento radiante, se va a probar a dejar una de ellas, la que une la parte intermedia del brazo con su final, quedando el prototipo de la siguiente manera:



**Figura 66. 2ª modificación del prototipo original**

Este nuevo diseño planteado, parece influir significativamente en el comportamiento de la antena tal y como muestra la curva de adaptación que resulta de su simulación:



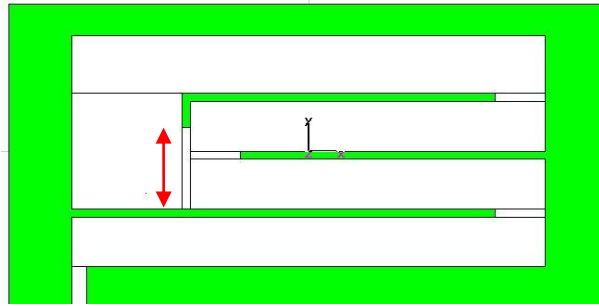
**Figura 67. Parámetro  $S_{1,1}$ [dB] de pérdidas correspondiente a la simulación de la nueva antena de doble banda con una sola muesca**

Cambian las propiedades electromagnéticas de la antena, pues las dos resonancias aparecen ahora muy bien adaptadas, formando dos bandas bien definidas. Éstas resuenan próximas a las frecuencias centrales de las bandas de operación de los sistemas GSM1800 y UMTS, aunque las bandas son estrechas y no cubren por completo el rango establecido para estos servicios. Aún así, el diseño final de la antena se va a mantener como en la figura 66, pues consigue una curva de adaptación muy próxima al objetivo marcado.

A continuación, se va a estudiar un poco más el efecto de esta muesca de unión para intentar conseguir un comportamiento más exacto al deseado.

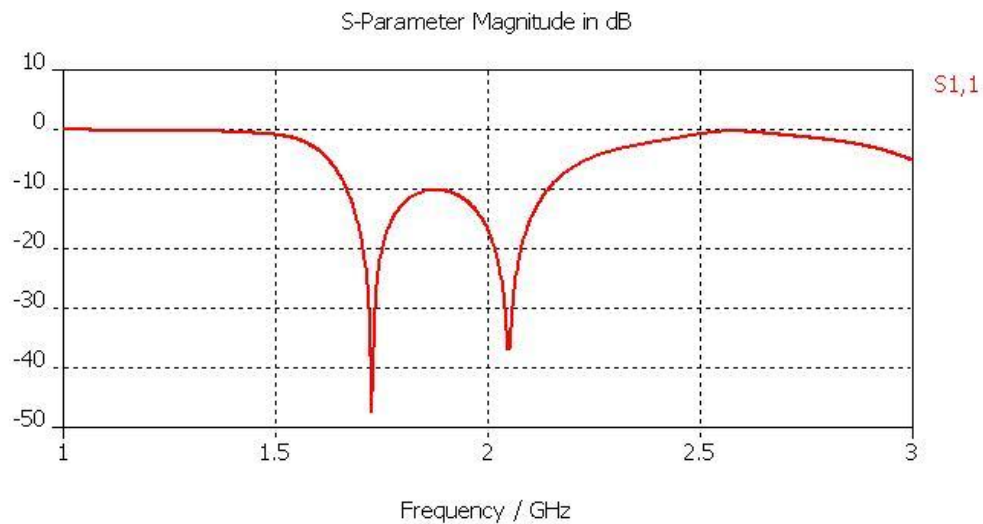
### ***c) Efectos producidos por la modificación de la muesca***

Se lleva cabo a continuación un aumento de la muesca de unión con el objetivo de aumentar el ancho de las bandas de operación del diseño anterior:



**Figura 68. Aumento de la muesca de unión**

Se ha duplicado su tamaño hasta los 2 cm, dando como resultado de la simulación la siguiente curva:



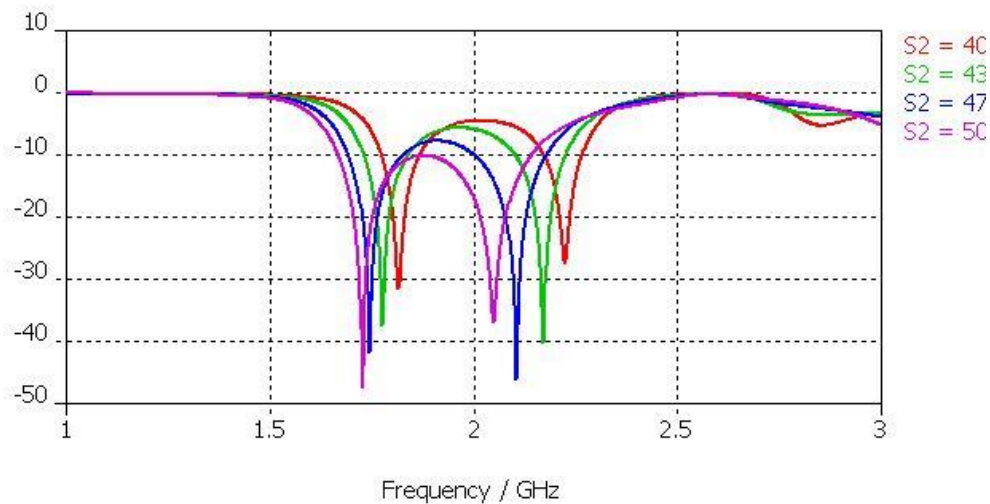
**Figura 69. Parámetro  $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a la simulación de la nueva antena de doble banda con una muesca del doble de tamaño**

Esta modificación consigue la curva de adaptación deseada, pues las dos resonancias quedan adaptadas perfectamente y, además, se consigue un aumento en el número de frecuencias adaptadas. En concreto, resuenan a 1730 MHz y 2050 MHz, que son las frecuencias centrales de las bandas de operación de los sistemas GSM1800 y UMTS respectivamente. Estas bandas se llegan incluso a fundir en una más grande que va desde 1670 MHz hasta los 2139 MHz, es decir, una banda del 24,6%. Con ella, se cubre el rango de frecuencias de GSM1800 y de UMTS, consiguiendo el objetivo marcado al inicio del apartado.

Con todo, se va a hacer la antena todavía más pequeña, realizándose un último estudio del modelo haciendo variar su altura hasta los 40 mm para comprobar si se siguen obteniendo los resultados esperados.

#### **d) *Modificación de la longitud de la antena***

Para disminuir su tamaño, se procede como en apartados anteriores, reduciéndose el tamaño de la línea de alimentación.



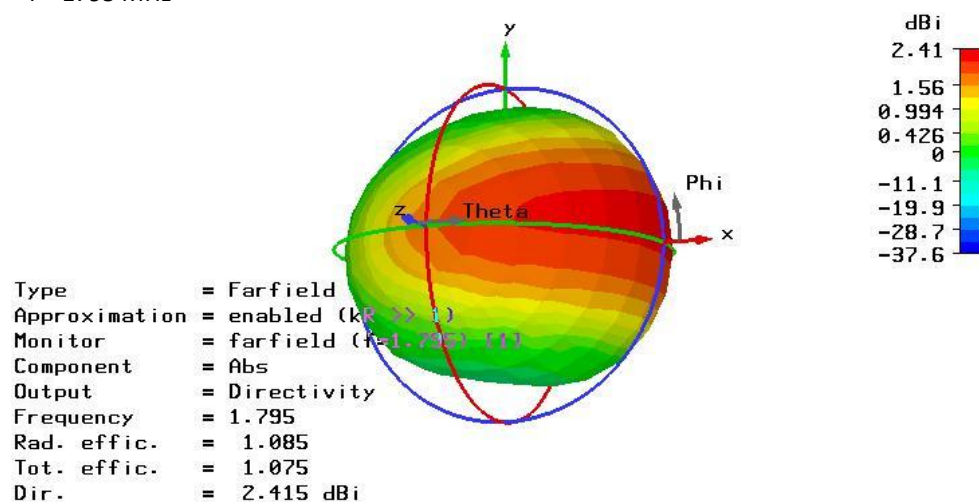
**Figura 70. Parámetro  $S_{1,1}$ [dB] correspondiente a la simulación de la nueva antena de doble banda con diferentes longitudes**

Se produce una desadaptación y una disminución de banda a medida que la longitud se hace más pequeña. Además, esta desadaptación provoca una reducción en la banda ancha, pues se llega a separar en otras dos más estrechas que no cubren todas las frecuencias deseadas. Por tanto, el parámetro ‘S2’ queda fijado finalmente en 50 mm. Esto significa que la antena mide 48 mm de “altura” y es posible por tanto introducirla en el interior de un radomo convencional de los que se incluyen en el techo de los vehículos actuales.

### 3.3.3 Diagramas de radiación y distribución de campo del modelo final

Para el modelo propuesto en el apartado anterior, se ha llevado a cabo la simulación de su diagrama de radiación, presentando a continuación su modelo en 3D en sus frecuencias de resonancia (1795 MHz y 2045 MHz). En primer lugar, la banda inferior:

- $f = 1795 \text{ MHz}$



**Figura 71. Diagrama en 3D a 1795 MHz de la antena GSM1800/UMTS**



Como en el capítulo 2, si se estudia la forma que tiene el diagrama de radiación, se deduce que en este caso la manera más conveniente de ubicar la antena en el coche, sería haciendo que el plano XZ de la antena sea paralelo al plano de masa que formaría el techo del vehículo, de manera que el diagrama de radiación alcance valores máximos precisamente en ese plano, siendo mínimo en la dirección perpendicular (eje Y).

Se muestran a continuación los planos de corte en coordenadas polares a sus frecuencias de resonancia para facilitar la comprensión del diagrama de radiación.

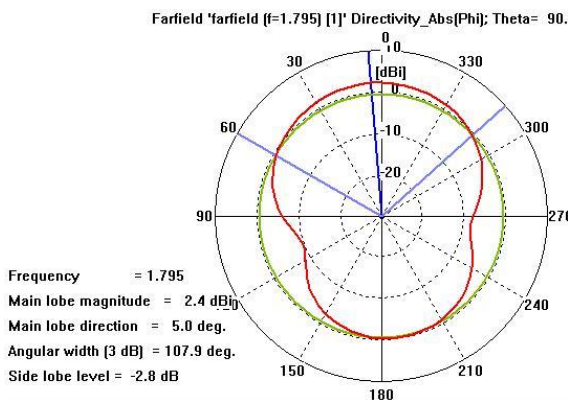


Figura 72. Plano XY a 1795 MHz(corte en theta=90°)

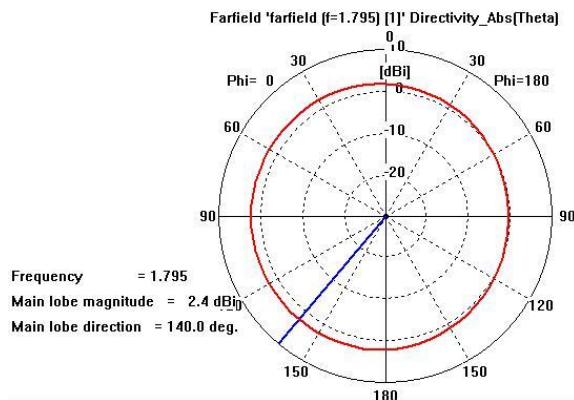


Figura 73. Plano XZ a 1795 MHz (corte en phi=0°)

En la figura 72 se presenta el plano XY, donde se aprecia cómo el diagrama no radia por igual en todas las direcciones del plano. Y si se observa la figura 73 correspondiente al plano XZ, queda reflejado como radia en todas las direcciones del plano XZ.

En el caso de trabajar en la banda superior correspondiente a la de UMTS, el diagrama queda de la siguiente manera:

- $f = 2045 \text{ MHz}$

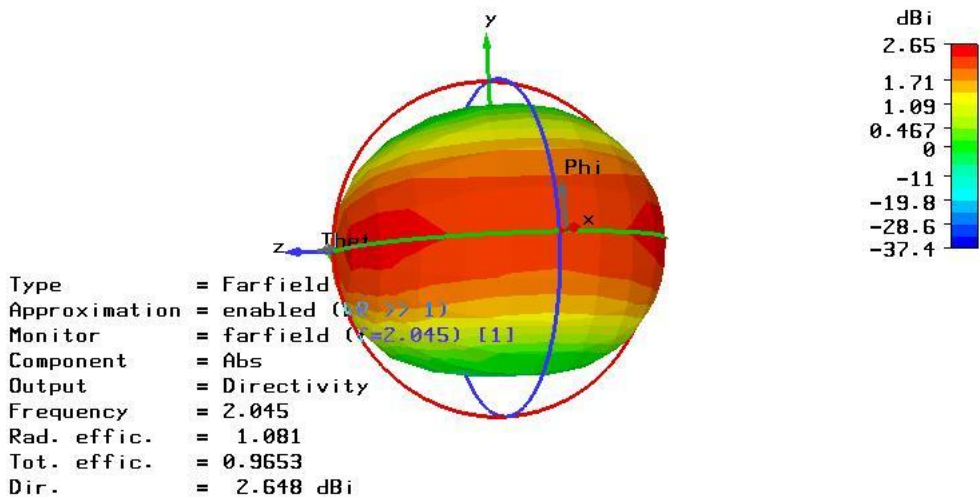


Figura 74. Diagrama en 3D a 2045 MHz de la antena GSM1800/UMTS

Se obtiene un diagrama de radiación similar al que tiene la banda mostrada anteriormente. A continuación, y para mayor precisión se presentan los planos de corte en coordenadas polares a sus frecuencias de resonancia para facilitar la comprensión del diagrama en tres dimensiones.



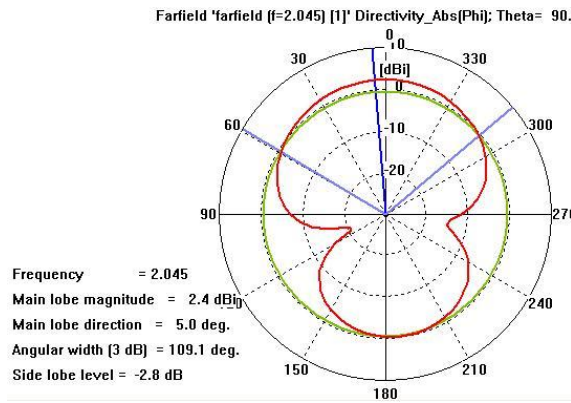


Figura 75. Plano XY a 2045 MHz(corte en theta=90°)

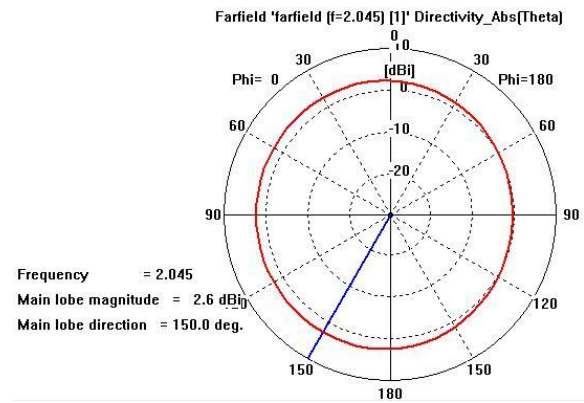


Figura 76. Plano XZ a 2045 MHz (corte en phi=0°)

La distribución de campo se muestra a continuación tanto para una frecuencia central como para la otra, refleja cómo se desborda el campo en los “brazos”, y cómo este se distribuye de manera similar dentro de la cavidad metálica. En primer lugar, se presenta a la frecuencia central de GSM1800:

▪ **f = 1795 MHz**

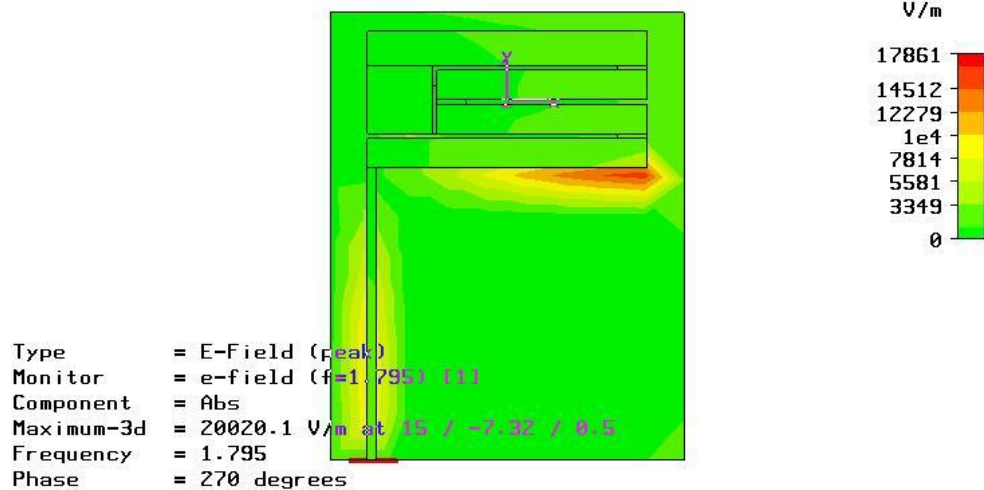


Figura 77. Distribución de campo a 1795 MHz (vista frontal)

En la figura 77 se observa la distribución a 1795 MHz correspondiente al módulo del campo eléctrico. Éste es máximo en la esquina inferior derecha de la antena, apreciándose poca intensidad en el resto. En la siguiente figura se quiere representar el campo entre las dos caras que forman la antena, es decir, en el interior del subtrato para comprobar mejor esa distribución:

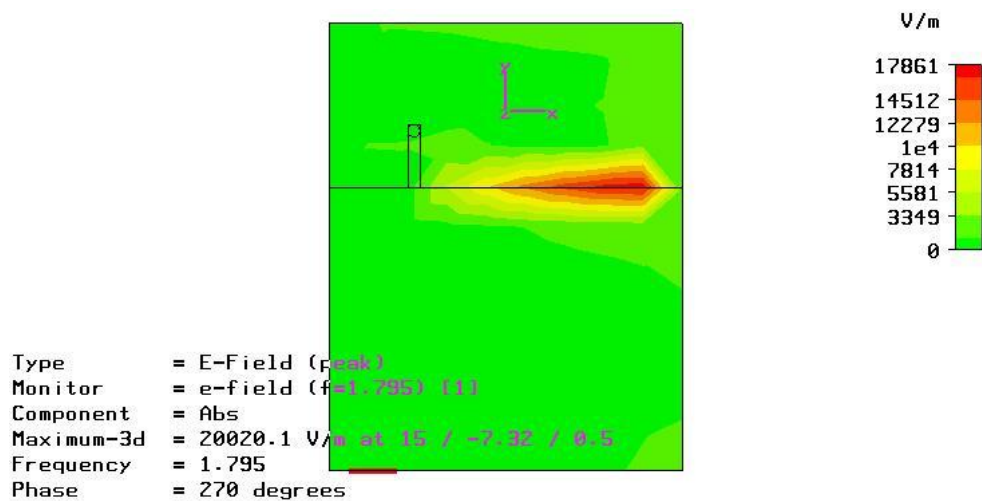


Figura 78. Distribución de campo dentro de la antena a 1795 MHz (vista frontal)

Y finalmente, vemos la distribución en la frecuencia central de la banda de UMTS, observándose diferencias respecto a la banda anterior:

- **f = 2045 MHz**

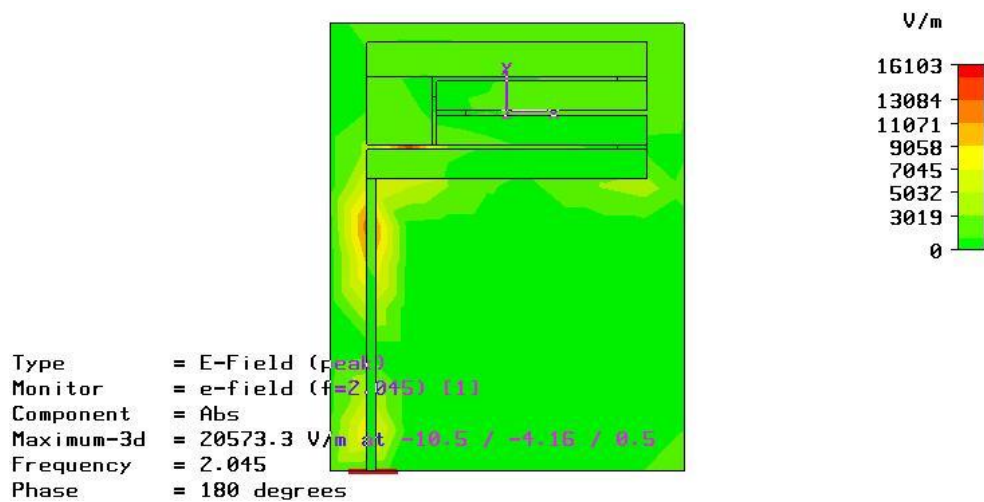


Figura 79. Distribución de campo a 2045 MHz (vista frontal)

En este caso, el mayor confinamiento del módulo del campo se produce entre el extremo inicial y final de lo que sería un monopolo replegado.

### 3.4 Fabricación y medida de la antena diseñada en doble banda para GSM1800 – UMTS

Tras el estudio, diseño y simulación del apartado 3.3, se procede a la fabricación de la antena para su posterior medida, de manera que se pueda comprobar si cumple los objetivos marcados en el proyecto y conseguidos en simulación.

Este proceso se llevó a cabo en el laboratorio del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad Carlos III de Madrid por un técnico de laboratorio.

Una vez fabricada, se puede ver en la figura 80 que se trata de una antena de reducido tamaño (48 mm), requisito necesario para que pudiese ser instalada dentro de un radomo en el techo de un coche. Además, se puede apreciar el detalle de su cara posterior en la figura 81, donde el plano de masa no cubre la parte posterior de la antena en su totalidad, sino que se evita llegar a la altura del elemento radiante para conseguir el efecto de monopolo plano y no el de un parche.

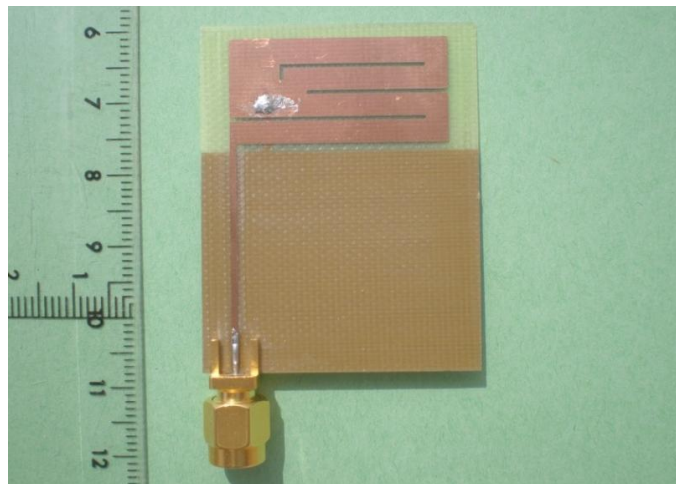


Figura 80. Vista frontal de la antena fabricada

En las fotografías se puede apreciar claramente la particularidad principal del diseño, que es que la capa metálica de la cara frontal está cortocircuitada con el plano de masa a través de un “pin de corto” que une ambas capas a través de un pequeño brazo o “península” en la cara trasera.

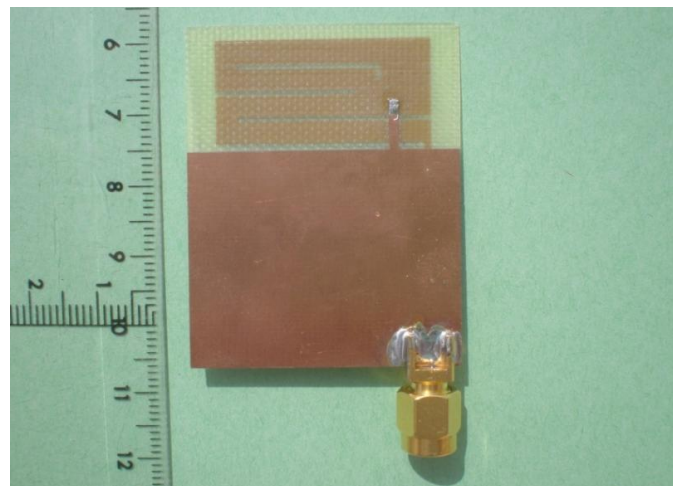


Figura 81. Vista trasera de la antena fabricada

### 3.4.1 Medida de la antena

Para medir la antena se utiliza el analizador de redes vectoriales que posee el Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones. Con él se pueden medir las pérdidas de retorno de la señal de entrada o, lo que es lo mismo, el parámetro  $S_{1,1}$  [dB] de la antena. De este modo, se comprueba en qué banda opera la antena y si se adapta en esas frecuencias.

#### a) Medida de la antena fabricada

Usando el analizador, se obtiene la siguiente curva de adaptación:

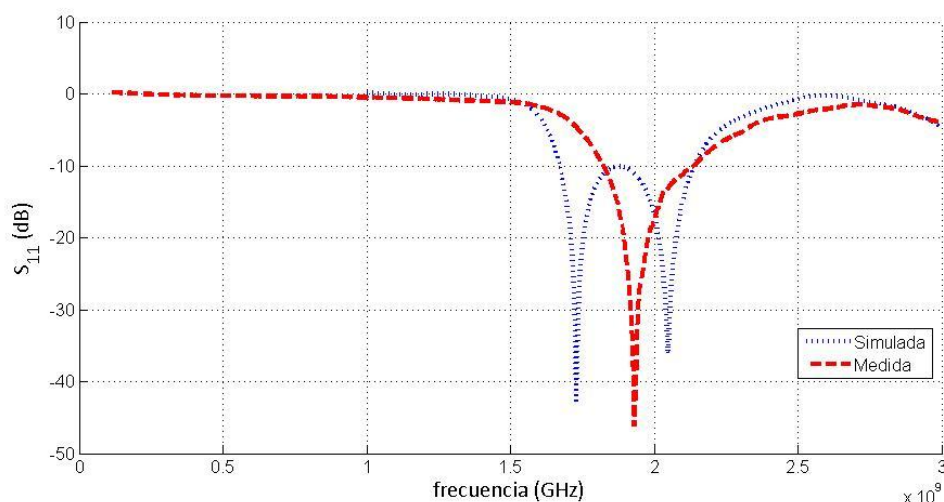


Figura 82. Comparación entre la simulación y la medida

Ésta difiere de la curva obtenida en simulación, pues como se observa, existe una sola resonancia adaptada que aparece en 1930 MHz, en lugar de las dos que se tenían en la simulación (1730 y 2046 MHz) y que se aproximaban a las frecuencias centrales de los servicios GSM1800 y UMTS (1795 y 2045 MHz). Además, la banda de operación de la medida es menor que la simulada:

**Banda medida:** 1824 – 2134 MHz (15,6%)

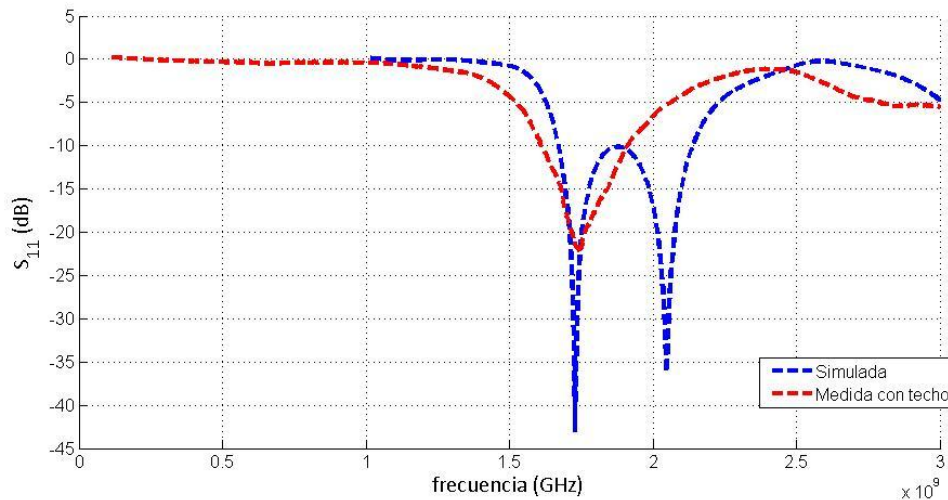
**Banda simulación:** 1670 – 2134 MHz (24,4%)

Aún así, se consigue una banda de operación que podría dar servicio de UMTS, proporcionando al pasajero del vehículo todas las utilidades que éste aporta: telefonía móvil, tráfico de datos de alta velocidad, acceso a Internet con todo lo que esto conlleva, etc. Por tanto, aunque la construcción de la antena no haya cubierto el objetivo alcanzado en simulación, se trata de una antena que podría instalarse en cualquier vehículo.

Se continúa con el estudio de la antena fabricada para conocer mejor su comportamiento, estudiando los posibles efectos que sobre ésta podría tener el plano metálico formado por el techo del coche.

#### b) Medida sobre un plano de masa perpendicular a la antena

Esta segunda medida trata de asemejar las condiciones de medida a un caso real. Es decir, teniendo en cuenta el efecto de conductor eléctrico perfecto que provocaría el techo de un coche, se coloca una lámina metálica perpendicular a la base de la antena, y se vuelve a medir en el analizador de espectros para obtener la curva de adaptación correspondiente.



**Figura 83. Comparación de la antena simulada con la antena-techo metálico**

Debido a la colocación de la lámina metálica, la medida de la antena cambia, pues se obtiene una curva cuya banda de operación está entre los 1612 MHz y los 1909 MHz (16,9%). Se produce por tanto, un desplazamiento en frecuencia con respecto a la simulación, así como un ensanchamiento en la banda de operación de la media si se compara con el caso anterior.

Además, en este caso se dejaría de dar servicio UMTS, a favor del de GSM1800, cuya banda de operación quedaría adaptada con esta antena.

### **c) Medida de la antena sobre el plano de masa y con un radomo**

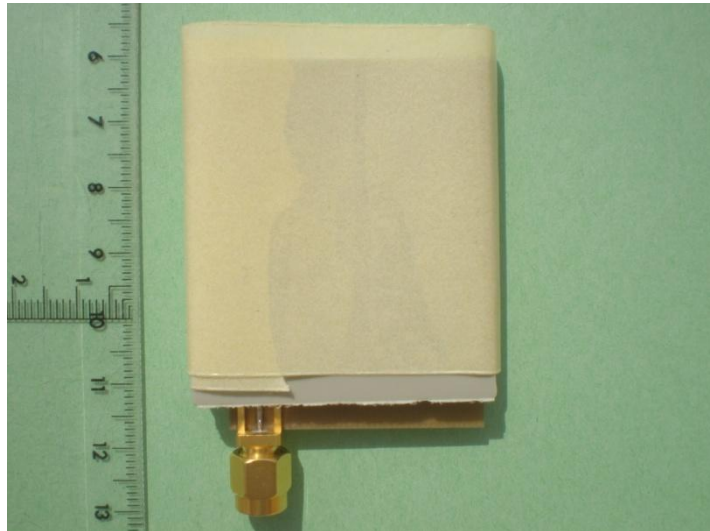
Como se comentó en el capítulo introductorio, los radomos son cubiertas de protección para la antena. Éstas se fabrican con materiales plásticos o de PVC que pretenden ser “transparentes” para las ondas de radio, es decir, que las propiedades electromagnéticas de la antena no se vean alteradas por introducirla en el interior del radomo.

Cada fabricante elige el tipo de material y la forma. Las más comunes son los de tipo “aleta de tiburón”.



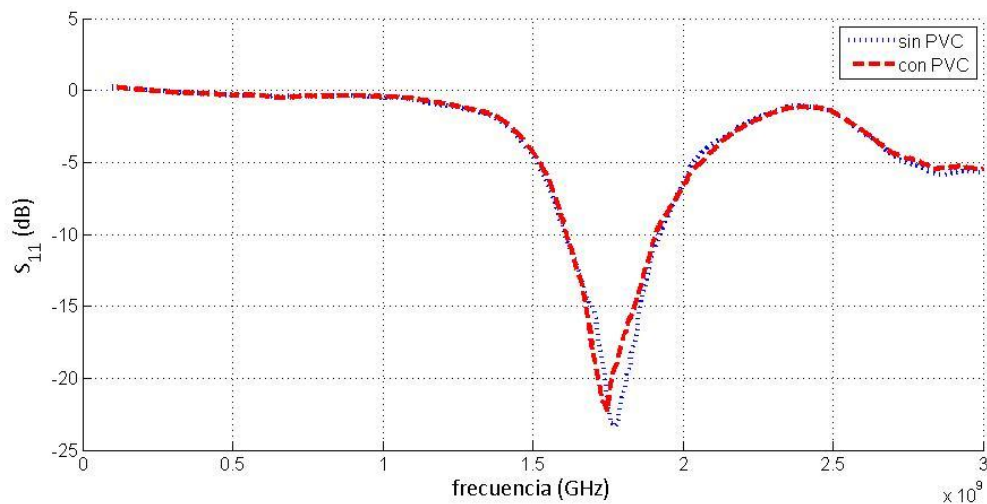
**Figura 84. Antena tipo "aleta de tiburón" sobre el techo de un coche**

En este proyecto, el efecto producido por el radomo se simula cubriendo la antena con un material de tipo PVC que podría asemejarse al utilizado por los radomos actuales. Se compone de dos láminas colocadas una en cada cara de la antena y unidas mediante cinta adhesiva:



**Figura 85. Antena real cubierta por el radomo provisional**

Teóricamente, este montaje no debe producir ninguna alteración electromagnética severa, pues el PVC no se comporta como conductor. Por tanto, se vuelve a medir la antena, pero esta vez con la placa metálica que simula el techo del coche y con el radomo provisional, obteniendo la siguiente curva de adaptación:



**Figura 86. Comparación de la antena-techo con y sin radomo**

No se observa ningún cambio significativo en el comportamiento del prototipo. Existe una pequeña variación en la frecuencia central de la banda de operación y en la adaptación, pero poco significativa. Por lo que parece indicar la medida, el radomo va a afectar muy poco en las propiedades electromagnéticas de la antena.

# Capítulo 4

## Conclusión y líneas futuras

En este proyecto se ha analizado, mediante simulaciones, el comportamiento de dos antenas impresas cuya finalidad es proporcionar más de un servicio inalámbrico en un vehículo.

Mediante el estudio de sus parámetros geométricos, se comprueba el grado de dependencia entre el valor de estos parámetros y las prestaciones de la antena.

Para los diseños estudiados, se ha optado por antenas impresas de tipo monopolo plano, ya que se reduce el tamaño respecto a los monopolos convencionales. Además poseen un diagrama de radiación que permite captar adecuadamente la señal que emiten las estaciones base de telefonía móvil. Además, su pequeño tamaño facilita su colocación en el techo de un coche y dentro de un radomo que las proteja. Sin embargo poseen un inconveniente, y es que es difícil conseguir anchos de banda que permitan cubrir tres o más servicios radio. Ello nos ha conducido en el proyecto al diseño de antenas de dos bandas.

Para ello, se estudian los parámetros geométricos más relevantes, consiguiendo diseñar una antena que es capaz de trabajar en simulación en las bandas de GSM1800 y UMTS. Este hecho permite la posibilidad de su incorporación en un vehículo, evitando así la instalación de las dos antenas que hubieran sido necesarias (una para cada banda).

Tras el estudio en simulación, se ha procedido a la fabricación del prototipo, de manera que se pueda medir con un analizador de redes vectoriales. El resultado de dicha medida permite darse cuenta de la diferencia de comportamiento entre una antena en simulación y una antena real, aunque finalmente se ha conseguido diseñar una que se adapta muy bien en las frecuencias de UMTS.

La medida poseía una banda más estrecha que la simulada y no se veían las dos resonancias con claridad.

Finalmente, concluir que la colocación de la antena dentro de un radomo de protección, no afecta de manera significativa a sus propiedades electromagnéticas, pues la medida no cambió mucho cuando se introdujo entre dos láminas de PVC. Por ello, su instalación se convierte en algo recomendable, pues disminuye la probabilidad de que la antena sufra desperfectos o robos.

En el caso de que se desee ampliar el trabajo realizado, se debería volver sobre el primer diseño y analizar por qué la primera banda no se adaptaba en simulación. De esta manera, si se consigue dar con una solución y adaptarla, quedarían cubiertas las bandas de GSM y el prototipo que se construyese en consecuencia podría ser de utilidad en la recepción de la señal de telefonía móvil 2G.

Otra línea de investigación sería la medida en radiación de la antena y, en particular, su diagrama de radiación para comprobar así si se parece al simulado. En caso negativo, se analizaría el porqué.

Con el objetivo de ampliar la banda de operación, otra línea abierta sería conseguir que se cubriesen las frecuencias correspondientes a otro servicio inalámbrico, como por ejemplo podría ser el Bluetooth o WLAN, que permitirían crear redes de datos entre los dispositivos que estuviesen en el interior del vehículo, o incluso redes con otros vehículos. Tendríamos por tanto una antena tribanda de tipo monopolo plano.

Finalmente, se podría llevar a cabo la integración de la antena en un vehículo y realizar pruebas de recepción de señal o de datos.



# Capítulo 5

## Presupuesto

Debido al incremento en la demanda de servicios inalámbricos por parte de los usuarios del sector del automóvil, y con el objetivo de reducir el número de antenas instaladas en los vehículos, se diseña una antena impresa capaz de trabajar en dos bandas de frecuencia diferentes. De esta manera, se reducen costes, se evita el posible efecto sobre la aerodinámica del coche y se evita colocar otra antena. En concreto, con esta antena se da servicio en la banda de GSM1800 y de UMTS, aportando al ocupante del vehículo la capacidad de comunicarse vía telefónica o vía Internet 3G.

El proyecto se lleva a cabo en tres fases diferentes:

1. Estudio (6 semanas)
  - I. Estudio de la tecnología de antenas impresas (2 semanas)
  - II. Búsqueda de un diseño adecuado a las necesidades (3 semanas)
  - III. Estudio del Estado del Arte (3 semanas)
2. Diseño (3 meses)
  - I. Diseño de antena para el sistema Galileo (4 semanas)
  - II. Diseño de antena para el servicio de telefonía móvil GSM (4 semanas)
  - III. Diseño de antena que opere en GSM1800 – UMTS (5 semanas)
3. Redacción del proyecto (16 semanas)
  - I. Capítulo 1: Introducción (4 semanas)
  - II. Capítulo 2: Antenas Galileo y GSM (8 semanas)
  - III. Capítulo 3: Antenas GSM1800-UMTS (10 semanas)
  - IV. Capítulo 4: Conclusión y líneas futuras (0,5 semanas)
  - V. Capítulo 5: Presupuesto (0,5 semanas)
4. Fabricación (0,5 semanas)

Al realizar alguna de las tareas en paralelo, el tiempo se reduce como muestra el siguiente Diagrama de Gantt:

TAREAS	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20
1.I																				
1.II																				
1.III																				
2.I																				
2.II																				
2.III																				
3.I																				
3.II																				
3.III																				
3.IV																				
3.V																				
4																				

Tabla 1. Diagrama de Gantt (en semanas)

A la hora de hacer una estimación del precio final de la antena construida, se tiene en cuenta la mano de obra, el equipo y el software usado para el diseño, y los materiales con los que se ha construido la antena. Se espera que la duración esté en torno a los 5 meses.

#### Mano de obra

Es necesario el trabajo de un ingeniero técnico de telecomunicación, cuyo sueldo será aproximadamente de 1200 €/mes para un ingeniero sin experiencia.

#### Equipo y Software utilizados

Se necesita un ordenador con su correspondiente software de diseño y simulación. En este caso, se usa el *CST Microwave Studio* para el diseño y preparación, por lo que es necesario comprar una licencia anual de uso. Éstas rondan los 4000 €, aunque para uso académico están subvencionadas, por lo que su precio se reduce a unos 1000 €/año aproximadamente. Además, será necesario medir el circuito terminado con un analizador de redes vectoriales que ascienden a 50.000 €, pero que se alquilará durante mes para las medidas necesarias.

#### Material utilizado

Se construirán un mínimo de 3 circuitos (antenas) para evitar posibles fallos de fabricación. El sustrato usado es FR4, por lo que cada circuito valdrá unos 50 €.

#### PRESUPUESTO:

CONCEPTO	PRECIO	TOTAL (€)
Ingeniero Técnico (5 meses)	5 x 1200 €/mes	6.000 €
Ordenador	500 €	500 €
Diseño y preparación	1000 € ÷ 12 meses x 5 meses	417 €
Circuito	3 x 50 €	150 €
Analizador de redes vectoriales	100 €/mes	100 €
<b>TOTAL</b>		<b>7.167 €</b>

Tabla 2. Presupuesto para la primera antena

El presupuesto total de este proyecto inicial asciende a la cantidad de SIETE MIL CIENTO SESENTA Y SIETE EUROS → # **7.167 €** #

Este precio sería aplicable al primer diseño de la antena. En el caso de que el cliente quedase satisfecho, se llevaría a cabo la fabricación de más antenas, teniendo en cuenta únicamente el precio del circuito y el sueldo del correspondiente técnico de laboratorio encargado de su fabricación. Por tanto, si suponemos una duración de un día en la fabricación de cada antena, el precio de cada antena sería:

CONCEPTO	PRECIO	TOTAL (€)
Técnico de laboratorio	30 €/dos horas	60 €
Circuito	50 €	50 €
TOTAL		110 €

**Tabla 3. Presupuesto de una antena construida tras el primer diseño**

El presupuesto de este proyecto tras el diseño de la primera antena asciende a la cantidad de CIENTO DIEZ EUROS → # **110 €** #

Leganés, a 13 de Enero de 2011

El ingeniero proyectista

Fdo. Manuel Campillo Muñoz

# Referencias

- [1] <http://www.marcamotor.com/2010/05/31/noticias/1275301372.html>
- [2] [www.natureduca.com/radioblog/?p=60](http://www.natureduca.com/radioblog/?p=60)
- [3] Andreas Kilian, Lorenz-Peter Schmidt, *"Conformal Superstrate Loaded Automotive Radar Antenna for Integration in Polymer Car Body Panels"*, 4<sup>th</sup> European Conference on Antennas and Propagation, Barcelona 2010.
- [4] E. Gschwendtner, W. Wiesbeck, *"Ultra-Broadband Car Antennas for Communications and Navigation Applications"*, IEEE Transactions on antennas and propagation, vol. 51, no.8, pp. 2020-2027, Agosto 2003.
- [5] Malgorzata Brzeska, Ramiro Quintero, Enrique Martínez, Laura Tantiñá, Rubén Riesco, Carlos Cisneros, Dídac Puy, *"New Generation of In-Mirror Integrated Antennas"*, 3rd European Conference on Antennas and Propagation, Berlín 2009.
- [6] J. L. Vázquez Roy, L. Inclán Sánchez, O. Quevedo Teruel, E. Rajo Iglesias, *"Wideband Zero-Mode Circular Patch Antenna"*, 4<sup>th</sup> European Conference on Antennas and Propagation, Barcelona 2010.
- [7] Brendan Pell, Wayne Rowe, Edin Sulic, Kamran Ghorbani, Sabu John, Rahul Gupta, Kefei Zhang, Brian Hughes, *"Experimental study of the effect of paint on embedded automotive antennas"*, Vehicular Technology Conference, Singapore 2008.
- [8] Deschamps, G.A., *"Microstrip Microwave Antennas"*, 3<sup>rd</sup> USAF Symposium on Antennas, 1953.
- [9] *"Microstrip Antenna Design Handbook"*, Garg, Bhartia, Bahl, Ittipiboon, Artech Housse 2001.
- [10] Howell, J. Q., *"Microstrip Antennas"*, IEEE AP-S Int. Symp.Digest, pp. 177-180, 1972.
- [11] Munson, R. E., *"Conformal Microstrip Antennas and Microstrip Phased Arrays"*, IEEE Trans. On Antennas and Propagation, Vol. AP-22, pp. 74-78, 1974.
- [12] Ana Contreras Pablo, *"Diseño de superficies soft de doble banda y su aplicación en antenas de parche"*, Proyecto Fin de Carrera, Universidad Carlos III de Madrid, Septiembre 2009.

- [13] *"Planar Antennas for Wireless Communications"*, Kin-Lu Wong, John Wiley & Sons, Inc. 2003.
- [14] K.L. Wong, G.Y. Lee, T.W. Chiou, *"Low-profile planar monopole antenna for multiband operation of mobile handsets"*, IEEE Transactions on antennas and propagation, vol. 51, no.1, pp. 121-125, Enero 2003.
- [15] Y.B. Kwon, J.I. Moon, S.O. Park, *"An internal triple-band planar inverted-f antenna"*, IEEE Antenna and Wireless propagation letters, vol.2, pp. 341-344, 2003.
- [16] <http://es.wikitel.info>
- [17] Kara, M., *"Formulas for the Computation of the Physical Properties of Rectangular Microstrip Antenna Elements with various Substrate Thickness"*, microwave and Opt. Technol. Let., Vol. 12, pp. 234-239, 1996.